

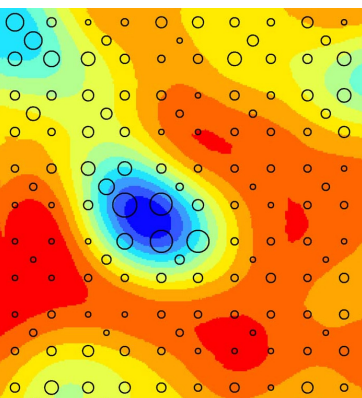
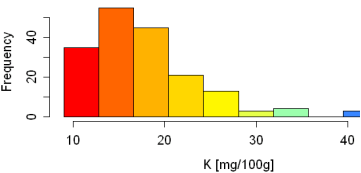
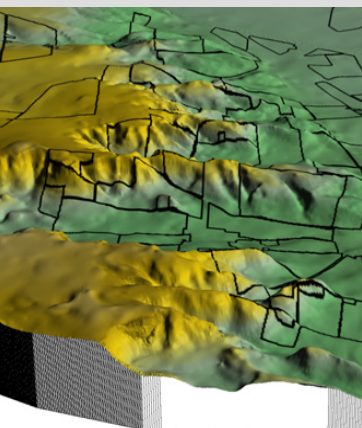


SACHSEN-ANHALT

Landesanstalt für
Landwirtschaft, Forsten
und Gartenbau



ATB
Agrartechnik Bornim



Teilflächenspezifische Grunddüngung



Gefördert durch die
Deutsche Bundesstiftung Umwelt



Bornimer Agrartechnische Berichte

Heft 72

Potsdam-Bornim 2009

Teilflächenspezifische Grunddüngung

*Gefördert durch die
Deutsche Bundesstiftung Umwelt*

**Bornimer Agrartechnische Berichte
Heft 72**

Potsdam-Bornim 2009

Herausgeber:

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam-Bornim

☎ (0331)-5699-0
Fax.: (0331)-5699-849
E-mail: atb@atb-potsdam.de
Internet: <http://www.atb-potsdam.de>

Autoren:

Dr.-Ing. Horst Domsch
Dipl.-Geograph Michael Schirrmann

Layout:

Dipl.-Ing. (FH) Katrin Witzke

Juni 2009

Herausgegeben vom Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB) auf der Grundlage eines abgeschlossenen Projektes.

Eine Weiterveröffentlichung von Teilen ist unter Quellenangabe und mit Zustimmung des Leibniz-Instituts für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. möglich.

ISSN 0947-7314

© Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Potsdam-Bornim 2009

Projekt
Teilflächenspezifische Grunddüngung

Projektleiter:	Dr.-Ing. Horst Domsch, ATB
Maßgeblicher Projektbearbeiter:	Dipl.-Geograph Michael Schirrmann, ATB
Projektmitarbeiter:	Dipl.-Ldw. Jürgen Nieter, Dawa Dipl.-Ldw. Otto Zauer, Dawa Dr. Hans-Ulrich von Wulffen, LLFG
Maßgeblich Beteiligte:	Dipl. Ing. (FH) Katrin Witzke, ATB

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim (ATB) e.V.
Abteilung Technik im Pflanzenbau
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam-Bornim
<http://www.atb-potsdam.de/>

Dawa-Agrar GmbH & Co.KG
Am Plan 3
39326 Dahlenwarsleben
<http://www.dawa-agrar.de/>

Landesanstalt für Landwirtschaft Forsten und Gartenbau (LLFG)
des Landes Sachsen-Anhalt
Strenzfelder Allee 22
06406 Bernburg
<http://www.llg-lsa.de/>

Gefördert durch:	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
Aktenzeichen:	24044
Projektbeginn:	15. Januar 2007
Laufzeit:	2 Jahre

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
1 Einleitung	8
2 Bodenprobenahme	10
2.1 Problemstellung	10
2.2 Einfluss der Verteilung der Einstichpunkte auf der Probenahme- fläche	13
2.2.1 Methoden.....	13
2.2.2 Ergebnisse.....	13
2.2.2.1 Die Häufigkeitsverteilungen der Nährstoffgehalte auf den Untersuchungsflächen	13
2.2.2.2 Korrelation zwischen den mit verschiedenen Probenahmevarianten ermittelten Nährstoffgehalten.....	14
2.2.2.3 Die absoluten Abweichungen zwischen den mit verschiedenen Probenahmevarianten ermittelten Nährstoffgehalten.....	15
2.2.2.4 Die räumlichen Verteilungen der mit verschiedenen Probenahme- varianten ermittelten Nährstoffgehalte	16
2.2.2.5 Der Normalfehler der Nährstoffgehalte bei variierenden Probenahmevarianten	17
2.2.3 Diskussion und Schlussfolgerungen	18
2.3 Einfluss des Zeitpunktes der Probenahme	19
2.3.1 Methoden.....	19
2.3.2 Ergebnisse.....	19
2.3.2.1 Die Häufigkeitsverteilungen der Nährstoffgehalte auf der Schlaggruppe 1..	19
2.3.2.2 Korrelationen zwischen den Nährstoffgehalten verschiedener Probenahmezeitpunkte	19
2.3.2.3 Die absoluten Abweichungen zwischen den Nährstoffgehalten verschiedener Probenahmezeitpunkte	20
2.3.2.4 Die räumliche Verteilung der zu verschiedenen Probenahmezeitpunkten ermittelten Nährstoffgehalte	20
2.3.2.5 Der Normalfehler der Nährstoffgehalte bei variierenden Probenahmezeitpunkten	21
2.3.3 Diskussion und Schlussfolgerungen	22
3 Erzeugung von Karten	22
3.1 Problemstellung	22
3.2 Basisvarianten zur Erzeugung von Karten.....	27
3.2.1 Methoden.....	27
3.2.2 Ergebnisse.....	28
3.2.3 Diskussion und Schlussfolgerungen	29

3.3	Einfluss der Größe sowie der Lage des Probenahmerasters	31
3.3.1	Methoden	31
3.3.2	Ergebnisse	31
3.3.3	Diskussion und Schlussfolgerungen	33
3.4	Vergleich von Rasterflächen mit Klassenflächen	33
3.4.1	Vergleich auf Schlagebene	33
3.4.1.1	Methoden	33
3.4.1.2	Ergebnisse	34
3.4.2	Vergleich innerhalb einer Region	35
3.4.2.1	Methoden	35
3.4.2.2	Ergebnisse	35
3.4.3	Beziehung zwischen den Nährstoffgehalten und der elektrischen Bodenleitfähigkeit.....	36
3.4.4	Diskussion und Schlussfolgerungen	37
3.5	Interpolation mit Kovariablen.....	37
3.5.1	Methoden	37
3.5.2	Ergebnisse	38
3.5.3	Diskussion und Schlussfolgerungen	39
4	Simulation.....	40
4.1	Problemstellung	40
4.2	Methoden	40
4.3	Ergebnisse	40
4.4	Schlussfolgerungen und Diskussion	41
5	Alternativen zur konventionellen Nährstoffkartierung	41
5.1	Problemstellung	41
5.2	Simulation eines on-the-go-Verfahrens.....	44
5.2.1	Methoden	44
5.2.2	Ergebnisse	44
5.3	Diskussion und Schlussfolgerungen	46
6	Kontrolle des Düngungsergebnisses	47
6.1	Problemstellung	47
6.2	Kurzfristige Veränderungen	47
6.2.1	Methoden	47
6.2.2	Ergebnisse	48

6.3	Mittelfristige Veränderungen	49
6.3.1	Methoden.....	49
6.3.2	Ergebnisse.....	49
6.4	Diskussion und Schlussfolgerungen	50
7	Teilflächenspezifische Phosphorbilanzen.....	51
7.1	Problemstellung	51
7.2	Methoden.....	52
7.3	Ergebnisse.....	53
7.4	Diskussion und Schlussfolgerungen	56
8	Wirtschaftlichkeit.....	57
8.1	Problemstellung	57
8.2	Methoden.....	57
8.3	Ergebnisse.....	58
8.4	Diskussion und Schlussfolgerungen	60
9	Zusammenfassung.....	61
	Literaturverzeichnis	67
	Abbildungsverzeichnis.....	72
	Tabellenverzeichnis.....	76
	Abbildungen.....	77
	In der Reihe Bornimer Agrartechnische Berichte sind bisher erschienen	127

1 Einleitung

Die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen bildet die Grundlage für die Bereitstellung einer hinreichenden Menge von Nahrungsgütern und Rohstoffen für die stetig zunehmende Bevölkerung der Erde. Ziel der Düngung sind der Ersatz der Nährstoffe, die dem Boden durch die Abfuhr der Ernteprodukte entzogen werden sowie die Einstellung bzw. Aufrechterhaltung einer für die Pflanzenproduktion optimalen Nährstoffversorgung des Bodens. Wenn nicht vollständiger Ersatz für die in den geernteten Früchten dem Boden entzogenen Stoffe stattfindet, müssen die für die Ernährung der Pflanzen wichtigen Mineralstoffe, die im Boden nur in beschränkter Menge vorhanden seien, endlich erschöpft werden. Dies sei „Raubbau“ argumentierte Justus Liebig bereits im Jahr 1840 (LIEBIG 1840).

In Deutschland regelt die Düngeverordnung die Rahmenbedingungen für die Durchführung der Düngung. Die neueste Fassung stammt vom 27. Februar 2007. Da neben einer Aushagerung auch eine Überdüngung zu vermeiden ist, wird gefordert, vor der Aufbringung wesentlicher Nährstoffmengen die im Boden verfügbaren Nährstoffmengen zu ermitteln. Die Probenahmen und Untersuchungen sind nach Vorgaben der nach Landesrecht zuständigen Stelle durchzuführen (ANONYM 2007). Die einzelnen Länder haben zur Umsetzung der novellierten Düngeverordnung Hinweise erarbeitet, in denen die Anforderungen der Düngeverordnung umgesetzt wurden.

Die Vorgaben der Bundesländer sind, obwohl sie im Wesentlichen übereinstimmen, nicht einheitlich, um sich den jeweiligen Standortbedingungen optimal anpassen zu können. Wenn erforderlich, wird im Weiteren schwerpunktmäßig auf die Vorgaben des Landes Sachsen-Anhalt Bezug genommen.

Obwohl die Düngeverordnung als Mindestanforderungen nur die Bodenuntersuchungen der pflanzenverfügbaren N- und P-Gehalte regelt, wird doch eine Bestimmung aller Grundnährstoffe (P, K, Mg) sowie des pH-Wertes im 4- bis 6-jährigen Turnus von der Officialberatung dringend empfohlen. Nach dem Gesetz sind die im Boden verfügbaren Phosphormengen durch Untersuchung für jeden Schlag ab 1 ha mindestens alle 6 Jahre zu ermitteln. Prinzipiell sind alle Betriebsinhaber verpflichtet, jährlich betriebliche Nährstoffvergleiche anzufertigen. Entgegen der bisherigen Düngeverordnung müssen die Nährstoffvergleiche jedoch nur noch für Stickstoff und Phosphor erstellt werden. Im Sinne der „Guten fachlichen Praxis der Düngung“ wird empfohlen, auch für Kalium die Berechnung der jährlichen Nährstoffbilanzen vorzunehmen (VON WULFFEN *et al.* 2007).

Neben den gesetzlich vorgeschriebenen Probenahmen kann eine umfassende Nährstoffgrundinventur erfolgen. Diese verfolgt das Ziel, eine Aussage über die Unterschiede in der Nährstoffversorgung von landwirtschaftlichen Flächen zu erhalten. Empfehlungsgemäß sollte sie nur anlassbezogen durchgeführt werden, z.B. wenn die Heterogenität der Nährstoffversorgung völlig unbekannt ist, die Gehaltsunterschiede zwischen Probenahmeflächen (Teilflächen, auf denen eine Mischprobe gezogen wird) vorangegangener Bodenuntersuchungen auf eine große Variabilität auf der Fläche hinweisen

oder wenn deutliche Wachstumsunterschiede in den Pflanzenbeständen des jeweiligen Feldes beobachtet werden (AUTORENKOLLEKTIV 2000). Die Nährstoffgrundinventur basiert auf einer Bodenuntersuchung in einem sehr kleinräumigen, gleichmäßig angelegten Raster.

In der Diskussion befindet sich auch das Testparzellenverfahren. Bei diesem werden nur ausgewählte Parzellen einer größeren Teilfläche untersucht und als repräsentativ für die Gesamtfläche unterstellt. Für die teilflächenspezifische Düngebedarfsermittlung ist es nicht geeignet (AUTORENKOLLEKTIV 2000).

Das Testparzellenverfahren kann aber sinnvoll als Nährstoff-Monitoring sein und die Nährstoffgrundinventur ergänzen. Durch häufigere Untersuchungen an wenigen Stellen, die vor allem auf der Grundlage einer Nährstoffgrundinventur ausgewählt werden sollten, ließe sich die zeitliche Dynamik der Nährstoffe besser erfassen (GEBBERS 2004).

Der Begriff der teilflächenspezifischen Düngung in seiner allgemeinsten Form wird als Gegensatz zur schlageinheitlichen Düngung gebraucht. Jede Unterteilung des Schlages bei der Düngung genügt bereits dieser Anforderung.

Eine teilflächenspezifische Düngung im engeren Sinne hat zum Ziel, die Nährstoffverteilung innerhalb eines Schlages auszugleichen. Das setzt eine Nährstoffgrundinventur voraus, um die vorhandene Verteilung der Nährstoffgehalte erkennen zu können (AUTORENKOLLEKTIV 2000).

Hervorgerufen werden kann eine große Variabilität in der Nährstoffversorgung nicht nur durch die Standortbedingungen, sondern auch durch die langjährige schlageinheitliche Düngung. So kann es z. B. nach ALBERT & SUNTHEIM (2004) bei schlageinheitlicher Düngung in Bereichen niedriger Erträge und somit auch geringerer P-Abfuhr zu einer allmählichen P-Anreicherung kommen. In Hohertragsbereichen hingegen übersteigen die Abfuhr regelmäßig die gedüngten P-Mengen, so dass die Nährstoffvorräte stark in Anspruch genommen werden. Hier ist eine teilschlagspezifische Düngung auf der Basis von georeferenzierten Ertragspotenzial- und Nährstoffkarten durchaus sinnvoll. Sie trägt zu einem effizienten Nährstoffmanagement bei und führt längerfristig zu einer ausgeglichenen Bodenversorgung.

Ziel des Projektes war es, unterschiedliche Aspekte einer teilflächenspezifischen Grunddüngung zu untersuchen. Dazu gehörte

- Varianten der Probenahme und der Erstellung von Flächenkarten der Nährstoffgehalte bzw. Nährstoffgehaltssklassen als die wesentliche Grundlage für Applikationskarten für die teilflächenspezifische Grunddüngung zu werten¹,
- zukünftige Probenahmeverfahren zu analysieren,

¹ Düngungsstrategien als weitere Voraussetzung für die Erstellung der Applikationskarten waren nicht Gegenstand der Untersuchung.

- die Kontrollmöglichkeiten durchgeführter Düngungsmaßnahmen abzuschätzen,
- für unterschiedliche Teilflächengrößen Phosphorbilanzen für 1 ha-Prüfflächen zu erstellen und
- für unterschiedliche Teilflächengrößen die Wirtschaftlichkeit einer teilflächenspezifischen Phosphordüngung zu kalkulieren.

Die experimentellen Untersuchungen fanden im Betrieb Agrar GmbH & Co.KG Dahlenwarsleben (Dawa) statt. Die Dawa bot auf Grund ihrer langjährigen kleinräumigen Datenerfassung und der bereits seit längerem praktizierten teilflächenspezifischen Grunddüngung die Voraussetzungen, um direkt oder mittels Simulation die interessierenden Teilprobleme gründlich analysieren zu können.

Die Schläge der Dawa liegen im Schwarzerdegürtel der Magdeburger Börde. Die nördlichen Teile befinden sich am Rande der Letzlinger Heide bzw. im Urstromtal der Ohre. Der Schwarzerdegürtel unterteilt sich im Betrieb in drei unterschiedliche Bereiche: in eine Ebene, die der Elbe und Ohre als Urstromtal diene, die so genannte „Niedere Börde“, in einen bergigen Bereich mit unterschiedlichen Ausgangsmaterialien und in einen Bereich der Hochflächen, der „Hohen Börde“ (**Bild 1**). Flächenmäßig überwiegt der bergige Bereich mit den Seitentälern der Elbe. Dort streichen unterschiedlichste Schichten von kiesigen Sanden über verschiedenen Lehmen bis hin zu schweren Tonen aus. Löss war im gesamten Gebiet mit großer Mächtigkeit vorhanden. Dieser ist aber sehr unterschiedlich erodiert bzw. wieder abgelagert worden.

Die erste komplette Bodenprobenahme im 1 ha-Raster auf den Flächen der Dawa erfolgte in den Jahren 1999-2002 durch unterschiedliche Dienstleistungsunternehmen. Die AGROCOM GmbH & Co. Agrarsysteme KG Bielefeld, vertreten durch das Regionalbüro Landsberg, war Hauptauftragnehmer für die Bodenprobenahme im Rahmen dieses Projektes. Als Nachauftragnehmer fungierte teilweise das Unternehmen Agrar Innovation Schier AIS Zeithain.

2 Bodenprobenahme

2.1 Problemstellung

Die Bodenprobenahme kann auf der Grundlage von Raster- oder Klassenflächen erfolgen. Als Klassenflächen werden in diesem Bericht Teilflächen bezeichnet, die auf der Grundlage eines bestimmten Merkmals durch Klassierung ausgegrenzt werden. Für die pflichtgemäße Probenahme werden Klassenflächen empfohlen, für deren Ausgrenzung im Wesentlichen Informationen zu nutzen sind, die bekannt oder leicht abgeschätzt werden können. Genannt werden Bodenart bzw. Bodenschätzdaten, Nutzungsvorgeschichte, Relief, Wasserverhältnisse, Ertragsdaten, Nährstoffgehalte früherer Probenahmen, insbesondere, soweit vorhanden, Daten einer durchgeführten Grundinventur, Daten der elektrischen Bodenleitfähigkeit usw. (AUTORENKOLLEKTIV 2000; KAPE *et al.*

2008; ANGERMAIR & LORENZ 2009). Mit der Probenahme wird der mittlere Nährstoffgehalt einer bereits abgegrenzten Fläche ermittelt (AUTORENKOLLEKTIV 2000).

Im Regelfall wird eine Probenahmefläche von maximal 5 ha / Probe empfohlen. Das Probenahmeraster kann bis zu 10 ha / Probe betragen, wenn relativ ausgeglichene Standortbedingungen vorliegen. Unter den Standortbedingungen von Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Mecklenburg-Vorpommern sind größere Probenahmeraster nur in begründeten Ausnahmefällen zulässig (VON WULFFEN *et al.* 2007).

Für die Nährstoffgrundinventur ist ein kleinräumiges, gleichmäßig angelegtes Raster vorzuziehen. Entscheidend für die Qualität der Erfassung der flächenhaften Nährstoffverteilung im Rahmen einer Nährstoffgrundinventur ist die Probenahmedichte bzw. die Größe der Probenahmeflächen. Bei einer flächenbezogenen Probenahme sollte das Raster bei einer Flächengröße von $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{2}$ ha liegen (AUTORENKOLLEKTIV 2000). Weisen die Flächen sehr heterogene Standortverhältnisse auf, sollte der Punktabstand zwischen benachbarten Probenahmepunkten 30 m betragen, jedoch nicht größer als 50 m ($\frac{1}{4}$ ha) sein (ANONYM 2003).

In der Praxis wird diese hohe Probenahmedichte aus wirtschaftlichen Gründen selbst von den Betrieben nicht realisiert, die die hinreichende Versorgung der Böden mit Nährstoffen als einen Schwerpunkt der Bewirtschaftung ansehen. Maximal wird die Grundinventur im 1 ha-Raster ausgeführt. Die in der Praxis derzeit genutzten Beprobungsraster von 1, 3 oder 5 ha sind letztendlich ein Kompromiss aus Aussagefähigkeit und Kosten. Je kleiner, desto genauer, aber auch teurer. Kostet ein 1-ha-Raster etwa 15 €/ha, so schlägt ein 3-ha-Raster mit 7 €/ha zu Buche und ein 5-ha-Raster mit ca. 5 €/ha (GRABO & PÖßNECK 2007). In der Praxis wird deshalb überwiegend das 3-ha Raster genutzt. Das 3 ha-Raster und dessen „intelligente“ Ausrichtung garantiert reproduzierbare Werte und stellt (unter bestimmten Umständen) einen vernünftigen Kompromiss dar.

Die Art der Bodenprobenahme sollte unabhängig von der speziellen Probenahmevariante einheitlich sein. Nach KAPE *et al.* (2008) sind für eine Mischprobe auf Ackerland mindestens 20 – 30 Einzelproben (Einstiche) aus der Krumentiefe (20 cm) zu entnehmen. Die Einstichstellen auf der Probenahmefläche sind entlang einer „Diagonalen“ oder einer „Zick-Zack-Form“ zu legen. Bei GPS-gestützter Probenahme ist auf der Probenahmefläche eine Kreisbeprobung um den Messpunkt zulässig. Der Umfang des Kreises hat dabei mindestens der Länge der Diagonalen der Probenahmefläche zu entsprechen. Eine Punktbeprobung (< 5 m Durchmesser, Umgehen des Probenehmerfahrzeuges) ist nur bei Probenahmeflächen < 1 ha zulässig.

Punktbezogene Probenahme wird vorrangig empfohlen, wenn mittels Interpolation in die Fläche geschlossen werden soll. Die Nährstoffgehalte einer flächenbezogenen Probenahme sollten dagegen primär der Probenahmefläche direkt zugeordnet werden (AUTORENKOLLEKTIV 2000). In der Praxis wird diese Empfehlung nur bedingt berücksichtigt. Nährstoffgehalte einer punktbezogenen Probenahme werden der Probenahmefläche

direkt zugeordnet und Nährstoffgehalte einer flächenbezogenen Probenahme auch interpoliert.

Punkt- bzw. flächenbezogene Probenahmen können zu variierenden Ergebnissen führen (WOLLENHAUPT *et al.* 1994). Ebenso kann auch die Verteilung der Einstiche innerhalb einer Probenahmefläche bzw. die Form und Größe der Beganglinie unterschiedliche Ergebnisse hervorrufen (PING 2008, ZINKEVICIUS 2008). Dieser Einfluss wird dagegen von GRABO & PÖßNECK (2007) als vernachlässigbar angesehen, wenn in ein „intelligentes“ Beprobungsraster auf der Grundlage von Messungen der elektrischen Bodenleitfähigkeit investiert wird.

Zur Abschätzung des Einflusses unterschiedlicher Varianten der Probenahme wurden im Rahmen des Projektes eigene Untersuchungen durchgeführt. Zu ermitteln war die Zuverlässigkeit einer 1 ha-Probenahme, die gegenwärtig als Kompromiss zwischen der geforderten kleinräumigen Probenahme für die Nährstoffgrundinventur und den auftretenden Kosten angesehen wird.

Günstige Probenahmeterminen ergeben sich auf Ackerland nach der Ernte von Getreide und Raps und im zeitigen Frühjahr vor Sommerungen und Hackfrüchten (KAPE *et al.* 2008). In der Praxis werden die Zeiträume für die Probenahme häufig ausgedehnt und nur unterbrochen, wenn die Böden gefroren oder unbefahrbar sind bzw. die Höhe der Pflanzenbestände eine Probenahme verbietet.

Eine schlechte Reproduzierbarkeit der Analysewerte verschiedener Jahre, unterschiedliche Verteilungen der Nährstoffgehaltsklassen bei Verschieben eines 100 m-Rasters innerhalb des Schlages, Abweichungen zwischen den Analysefehlern zweier Labore und kaum Reaktion des Ertrages auf unterschiedliche Düngung waren das Ergebnis einer Untersuchung vor etwa 10 Jahren, das zur Schlussfolgerung führte, dass eine teilflächenspezifische Düngung mit Phosphat und Kali nur anhand langfristiger Ertragsdifferenzen und der dadurch hervorgerufenen teilflächenspezifisch differenzierenden Entzüge befürwortet werden könnte (BRENK 1999, BRENK *et al.* 1999).

In einer neueren Untersuchung wird erneut die Reproduzierbarkeit von Bodenparametern und damit ihre Vorhersage über einen bestimmten Zeitraum bestritten. Veränderungen der räumlichen Variabilität von Kenngrößen der Bodenfruchtbarkeit für das nächste Frühjahr auf der Basis von Untersuchungen im vorangegangenen Herbst wären nicht vorhersagbar (HOSKINSON *et al.* 2003). Zu den untersuchten Bodenparametern gehörte jedoch nur Kalium aus der Gruppe der Makronährstoffe.

Neben der Frage nach der räumlichen Reproduzierbarkeit der Nährstoffgehalte war folglich auch die Frage nach der zeitlichen Reproduzierbarkeit zu klären. Dabei stand im Vordergrund, ob sich Probenahmen im Herbst und im Frühjahr signifikant unterscheiden.

2.2 Einfluss der Verteilung der Einstichpunkte auf der Probenahme­fläche

2.2.1 Methoden

Die Untersuchungen erfolgten im Herbst 2007 auf 100 x 100 m- (1 ha)-Probenahme­flächen auf 2 Schlägen (Siegrennbreite mit 36 und Sandberg mit 59 Probenahme­flächen). Getestet wurden 3 Varianten der Einstichverteilung (**Bild 2**). In der Probenahme­variante 1 (PV1) erfolgte die Anordnung von 18 Einstichen auf einem mittigen Kreis mit einem Durchmesser von 10 m. Für die Probenahmevariante PV2 wurden die 1 ha-Probenahme­flächen in Viertel eingeteilt und auf einer mittigen 10 m-Linie in jedem Viertel 4 Einstiche getätigt. Für die Probenahmevariante PV3 wurden die Probenahme­flächen in Neuntel aufgeteilt und die Einstiche auf mittigen 10 m-Strecken vorgenommen. An jedem Ende der Strecke erfolgte jeweils ein Einstich. Die 9 Einstiche des einen Streckenendes (PV3.1) wurden getrennt von den 9 Einstichen des anderen Streckenendes (PV3.2) gesammelt.

Die Probenahmevariante PV1 entspricht der zentralen punktbezogenen Bodenprobe­nahme. Die Probenahmevarianten PV2 und PV3 bilden eine zunehmend gleichmäßige Verteilung der Einstiche innerhalb der Probenahme­fläche ab, ohne eine der üblichen Beganglinien zu nutzen. Es sind Beispiele für flächenbezogene Probenahmen. Die Probenahmevarianten PV3.1 und PV3.2 führen zu gleichwertigen Mischproben, deren Entnahmepunkte um 10 m versetzt sind. Durch Mittelung ihrer Analysewerte ergibt sich die Probenahmevariante PV3.

Das Aufsuchen der Einstichpunkte geschah unter Nutzung von DGPS-Navigationsgeräten mit einer Genauigkeit von etwa 1,5 m. Für die Einstiche wurden Handbohrer mit einem Durchmesser von 2,5 cm genutzt. Die Entnahmetiefe betrug 25 cm. Der Boden der Einstiche wurde in einem Probeeimer gesammelt, gemischt, verpackt und gekennzeichnet.

Im Labor der Landesanstalt für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau des Landes Sachsen-Anhalt (LLFG) wurden für alle Mischproben der pH-Wert sowie die P-, K- und Mg-Gehalte bestimmt. Die Bestimmung des pH-Wertes sowie des Magnesiums erfolgte nach der CaCl_2 -Methode, die Bestimmung des Phosphors sowie des Kaliums nach der Doppellactat-Methode. Die Bewertung der Nährstoffgehalte und der pH-Werte erfolgte durch Einteilung in die Gehaltsklassen A (sehr niedrig) bis E (sehr hoch) (VON WULFFEN *et al.* 2008).

2.2.2 Ergebnisse

2.2.2.1 *Die Häufigkeitsverteilungen der Nährstoffgehalte auf den Untersuchungs­flächen*

Die beiden Untersuchungsschläge weisen unterschiedliche pH-Werte und Nährstoffgehalte auf, wie auf der Basis der flächenbezogenen Probenahmevariante PV3 zu erkennen ist (**Bild 3**). Am stärksten unterscheiden sich die pH-Werte. Auf der Siegrennbreite

sind die Werte bei einem Mittelwert von 6,5 etwa normal verteilt (symmetrisch glockenförmig um den Mittelwert). Auf dem Sandberg treten fast ausschließlich sehr hohe Werte auf, was zu einem Mittelwert von 7,5 und einer geringen Streuung (Standardabweichung STABW) von 0,26 führt. Demgegenüber ist die Streuung der pH-Werte auf der Siegrennbreite etwa doppelt so hoch.

2.2.2.2 Korrelation zwischen den mit verschiedenen Probenahmevarianten ermittelten Nährstoffgehalten

Die Nährstoffgehalte, die innerhalb der gleichen Probenahmeflächen aber mit unterschiedlichen Probenahmevarianten ermittelt wurden, stimmen auf den untersuchten Schlägen nur eingeschränkt überein. In den **Bildern 4 und 5** wurden die Analysewerte der verschiedenen Probenahmevarianten untereinander verglichen. Die Zuordnung der Probenahmevarianten zu den jeweiligen x- bzw. y-Achsen sind den Feldern der Diagonalen zu entnehmen.

Auf der Siegrennbreite ist die Übereinstimmung am höchsten zwischen den Probenahmevarianten PV3.1 und PV3.2, deren Einstichpunkte nur um 10 m zueinander versetzt waren (**Bild 4**). Die Korrelationskoeffizienten, die zwischen 0 (kein Zusammenhang) und -1 bzw. +1 (eindeutiger Zusammenhang) variieren können, sind mit Ausnahme des Kaliums größer als 0,9. Kalium weist wahrscheinlich eine hohe kleinräumige Variabilität auf, so dass die geringere Anzahl von 9 Einstichen je Mischprobe sich stärker auswirkte. Generell höher sind die Unterschiede zwischen der punktbezogenen Probenahmevariante PV1 und den flächenbezogenen Probenahmevarianten PV3.1 bzw. PV3.2. Am besten ist noch die Übereinstimmung für Magnesium, am geringsten wiederum für Kalium.

Auf dem Sandberg wird für die Korrelation zwischen den Probenahmevarianten PV3.1 und PV3.2 nur für Phosphor und Magnesium noch ein Korrelationskoeffizient von 0,9 erreicht (**Bild 5**). Für den pH-Wert sinkt der Koeffizient auf 0,85 und für den Kaliumgehalt auf 0,76. Damit ist der Zusammenhang für den Kaliumgehalt zwischen den Probenahmevarianten auch auf dem Sandberg am geringsten, wenn auch der Korrelationskoeffizient etwas höher als auf der Siegrennbreite ist. Der Zusammenhang zwischen der punktbezogenen Probenahmevariante PV1 und den flächenbezogenen Probenahmevarianten PV3.1 bzw. PV3.2 ist für alle Nährstoffgehalte auf dem Sandberg ähnlich hoch wie auf der Siegrennbreite.

Nur auf dem Sandberg untersucht wurde die flächenbezogene Probenahmevariante PV2, deren Einstiche in den Vierteln der Probenahmefläche verteilt worden waren (**Bild 5**). Die Korrelation zwischen ihr und den flächenbezogenen Probenahmevarianten PV3.1 bzw. PV3.2 ist generell höher als zwischen ihr und der punktbezogenen Probenahmevariante PV1. Das bedeutet, dass schon geringfügig verteilte Einstiche auf der Probenahmefläche günstiger als eine punktbezogene Bodenprobenahme sind, wenn es gilt, die Probenahmefläche repräsentativ zu beschreiben.

2.2.2.3 Die absoluten Abweichungen zwischen den mit verschiedenen Probenahmevarianten ermittelten Nährstoffgehalten

Neben den Korrelationskoeffizienten sind die maximalen absoluten Abweichungen zwischen den Nährstoffgehalten in Abhängigkeit von den Probenahmevarianten von Bedeutung. Bestimmt wurden die maximalen Abweichungen jeweils für 50 % (P50) bzw. 90 % (P90) der Probenahmeflächen, deren Werte sich am besten gleichen (**Tab. 1**).

Tabelle 1: Die absoluten Differenzen der Nährstoffgehalte zwischen verschiedenen Probenahmevarianten auf den Schlägen Siegrennbreite und Sandberg für 50 % (P50) bzw. 90 % (P90) der Probenahmeflächen

			Siegrennbreite		Sandberg		
			PV1-PV3	PV3.2-PV3.1	PV1-PV3	PV3.2-PV3.1	PV2-PV3
pH-Wert	-	P50	0.20	0.10	0.10	0.10	0.15
		P90	0.70	0.20	0.30	0.20	0.10
P	mg/100g	P50	1.57	0.88	2.03	1.02	1.48
		P90	8.07	2.51	4.73	2.50	3.57
K	mg/100g	P50	1.77	2.85	3.37	1.31	1.46
		P90	8.37	5.70	9.33	6.00	4.87
Mg	mg/100g	P50	0.72	0.43	0.55	0.31	0.38
		P90	1.89	1.18	2.64	0.70	1.19

Zwischen den um 10 m versetzten Probenahmevarianten PV3.1 und PV3.2 sind die Unterschiede für 50 % bzw. 90 % aller Probenahmeflächen $\leq 0,1$ bzw. $\leq 0,2$ für den pH-Wert und nicht größer als etwa 1 mg/100 g Boden bzw. 2,5 mg/100 g Boden für den Phosphorgehalt. Für den Kaliumgehalt ist die Differenz für 50 % der Probenahmeflächen auf der Siegrennbreite mit 2,8 mg/100 g mehr als doppelt so hoch wie auf dem Sandberg. Betrachtet man dagegen 90 % der Probenahmeflächen, sind die maximalen Unterschiede mit etwa 6 mg/100 g wieder gleich groß. Für den Magnesiumgehalt sind die Differenzen auf der Siegrennbreite generell etwas höher. Die unterschiedlich hohen Korrelationskoeffizienten aus den **Bildern 2** und **3** werden durch die absoluten Differenzen untermauert.

Die Unterschiede werden größer bei dem Vergleich zwischen den punktbezogenen Probenahmevarianten PV1 und den flächenbezogenen Probenahmevarianten PV3. Die maximalen Differenzen auf 90 % der Probenahmeflächen steigen für den pH-Wert bzw. die Phosphor-, Kalium- und Magnesiumgehalte auf 0,7, bzw. 8,1, 9,3 und 2,6 mg/100 g Boden an. Diese maximalen Werte treten im Wechsel auf der Siegrennbreite und auf dem Sandberg auf. Bei dem Vergleich zwischen den beiden flächenbezogenen Probenahmevarianten PV2 und PV3 auf dem Sandberg sind die Abweichungen wieder geringer.

Generell zeigt es sich, dass besonders die Kaliumgehalte empfindlich auf die verschiedenen Probenahmevarianten reagieren. Aber auch der Phosphorgehalt variiert deutlich zwischen den punkt- und flächenbezogenen Probenahmevarianten.

2.2.2.4 Die räumlichen Verteilungen der mit verschiedenen Probenahmevarianten ermittelten Nährstoffgehalte

Die Unterschiede zwischen den in Abhängigkeit von den Probenahmevarianten ermittelten Nährstoffgehalten bzw. Nährstoffgehaltsklassen werden deutlich sichtbar, wenn die entsprechenden Werte den Probenahmeflächen zugewiesen werden. In den **Bildern 6** und **7** sind die Nährstoffgehalte dargestellt. Da die Klassierung der Nährstoffgehalte der Einstufung in Gehaltsklassen angepasst wurde, können die Nährstoffgehalte auch als Nährstoffgehaltsklassen interpretiert werden.

Die beste Übereinstimmung zwischen den Probenahmevarianten ergibt sich für den pH-Wert auf dem Sandberg. Die einheitlich hohen Werte ließen keine Unterschiede zwischen den Probenahmevarianten zu. In allen anderen Darstellungen ist der Einfluss der Probenahmevariante deutlich zu erkennen.

Um die Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede der Gehaltsklassen, ermittelt mit den verschiedenen Probenahmevarianten, zahlenmäßig erfassen zu können, erfolgte ein Vergleich mittels so genannter Klassenplots (**Bilder 8** und **9**).

Die Klassenplots stellen auf der Abszisse die nach der Gehaltsklasse geordneten Probenahmeflächen und auf der Ordinate die Gehaltsklassen dar. Die grau gefärbten Balken zeigen kumulativ die Anzahl der Probenahmeflächen der jeweiligen Gehaltsklasse auf der Grundlage der flächenbezogenen Probenahmevariante PV3. Auf der Siegreinnbreite sind dies 36 und auf dem Sandberg 59 Teilflächen. Die nach oben gerichteten hellen bzw. nach unten gerichteten schwarzen Balken kennzeichnen dagegen die Anzahl der höher bzw. niedriger eingestuft Probenahmeflächen durch die zum Vergleich dienenden Probenahmevarianten.

Die punktbezogene Probenahmevariante PV1 führt auf dem Schlag Siegreinnbreite insbesondere für Phosphor zu veränderten Einstufungen in die Gehaltsklassen im Vergleich zur flächenbezogenen Probenahmevariante PV3 (**Bild 8**). Die Anzahl der Probenahmeflächen, die nicht verändert werden und folglich die gleiche Einstufung aufweisen, umfasst nur etwa die Hälfte der Probenahmeflächen. Die Gehaltsklassen der übrigen Probenahmeflächen verändern sich um eine Gehaltsklasse, auf zwei Probenahmefläche allerdings um zwei Gehaltsklassen.

Im Vergleich zu Phosphor ist die Anzahl unterschiedlich eingestufter Probenahmeflächen bei Kalium relativ gering. Die relativ großen Unterschiede in den Kaliumgehalten zwischen den Probenahmevarianten sind nach der Umwandlung in Gehaltsklassen reduziert worden. Für den pH-Wert und Magnesium sind die Veränderungen moderat.

Auf dem Sandberg führt der Vergleich zwischen der flächenbezogenen Probenahmevariante PV3 und der punktbezogenen Probenahmevariante PV1 für die pH-Wert aufgrund der Einstufung der meisten Probenahmeflächen in die Gehaltsklasse E nur zu geringen Veränderungen (**Bild 9**).

Groß ist dagegen der Einfluss der Probenahmevarianten auch auf dem Sandberg bei Phosphor. Nur wenige Probenahmeflächen werden unabhängig von der Probenahmevariante einheitlich einer Gehaltsklasse zugeordnet. Für Kalium und Magnesium ist die Übereinstimmung dagegen wieder höher.

Auf dem Sandberg war auch der Vergleich der beiden flächenhaften Probenahmevarianten PV2 und PV3 möglich. Die Anzahl der Probenahmeflächen, die unabhängig von der Probenahmevariante die gleiche Gehaltsklasse aufweisen, ist höher als bei dem Vergleich der punktbezogenen Probenahmevariante PV1 mit der flächenbezogenen Probenahmevariante PV3. Doch ist die Anzahl der Probenahmeflächen mit unterschiedlich ausgewiesenen Gehaltsklassen trotzdem noch hoch. Auch bei diesem Vergleich ergeben sich die größten Unterschiede für Phosphor.

2.2.2.5 Der Normalfehler der Nährstoffgehalte bei variierenden Probenahmevarianten

Der Normalfehler, der durch die Probenahme und die Laboranalyse entsteht, erlaubt eine Abschätzung des Einflusses der untersuchten Probenahmevarianten auf die Nährstoffgehalte. Als Maß des Normalfehlers wird der Variationskoeffizient verwendet (Kerschberger und Richter 1992 in GRABO & PÖßNECK 2007). Durch die Nutzung besserer Technik sind die Normalfehler in den letzten Jahren gesunken (GRABO & PÖßNECK 2007).

Der Normalfehler der durchgeführten Probenahmen wird als Mittel aus den 59 Probenahmeflächen des Sandberges berechnet. Nur auf diesem Standort erfolgte die Probenahme auf den Probenahmeflächen nach zumindest 4 Varianten (**Tab. 2**).

Tabelle 2: Normalfehler für Probenahme und Laboranalyse gemäß Grabo & Pößneck 2007 und gemäß eigener Untersuchungen

	Normalfehler, Variationskoeffizient, Untersuchung		
	90er Jahre ¹ %	2006 %	Probenahmevarianten 2007 %
pH-Wert	5	2	1
P	20	14	27
K	25	13	17
Mg	12	8	10

¹Kerschberger, Richter 1992

Mit Ausnahme des pH-Wertes, der wegen des hohen pH-Niveaus auf dem Sandberg nur geringfügig variieren kann, sind die gemessenen Normalfehler für alle Nährstoffe größer als von GRABO & PÖßNECK (2007) angegeben.

2.2.3 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Anordnung der Einstiche auf einer Probenahme­fläche, selbst wenn diese nur 1 ha groß ist, übt einen deutlichen Einfluss auf die Wiedergabe der Verteilung der Nährstoff­gehalte bzw. der Gehaltsklassen der Nährstoffe und in der Folge auf die Düngeempfehlung für die Probenahme­flächen aus. Das Resultat stimmt mit Ergebnissen, die unter anderen Bedingungen ermittelt wurden, überein (WOLLENHAUPT *et al.* 1994, PING *et al.* 2008, ZINKEVICIUS 2008).

Die ermittelten Normalfehler der Probenahme liegen tendenziell über denen, die GRABO & PÖßNECK (2007) angeben. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Laborfehler, da die Untersuchungen zum gleichen Zeitpunkt in einem Labor durchgeführt wurden, als gering zu unterstellen ist. Damit sind die hohen Fehler vor allem auf die sich unterscheidenden Varianten der Einstichverteilung, von der quasi punktbezogenen bis zur weitgehend gleichmäßigen Verteilung innerhalb der Probenahme­fläche, zurückzuführen. Um bei Wiederholungsmessungen den Probenahme­fehler gering zu halten, sind folglich zumindest ähnliche Verteilungen der Einstiche bzw. ähnliche Beganglinien zu nutzen.

Punktbezogene Probenahmen werden stärker als flächenbezogene Probenahmen durch die kleinräumige Verteilung der Nährstoffgehalte beeinflusst. Solange bei der Düngung die kleinräumige Verteilung der Nährstoffe nicht berücksichtigt werden soll, ist auf ihre Ermittlung zu verzichten. Somit sind, um einen repräsentativen Mittelwert zu bestimmen, flächenhafte Probenahmen mit einer möglichst gleichmäßigen Verteilung der Einstichpunkte innerhalb der Probenahme­flächen zu bevorzugen.

Durch die Untersuchungen wird die Empfehlung bestätigt, eine punktbezogene Probenahme für Probenahme­flächen ≥ 1 ha nicht zuzulassen (KAPE *et al.* 2008). Damit sollte sie auch bei den von einigen Betrieben durchgeführten Probenahmen im 1 ha-Raster unterbleiben. Empfohlen wird die punktbezogene Probenahme nur bei anschließender Interpolation (ANONYM 2003). Die Bewertung in diesem Zusammenhang erfolgt im Punkt 3.1.

Der Vorzug der 1 ha-Probenahme ist die im Vergleich zu größeren Probenahme­flächen kleinräumigere Ermittlung der Nährstoffverteilung. Sie gewährleistet allerdings noch nicht die zuverlässige Ermittlung der Nährstoffverteilung, wie sie für eine Grundinventur wünschenswert wäre. Das Raster ist noch zu groß, um die wahre Verteilung abbilden zu können. Ziel der 1 ha-Probenahme kann somit nur die Bestimmung eines mittleren Nährstoffgehaltes der Probenahme­fläche sein. Um diesen ermitteln zu können, muss eine flächenbezogene Probenahme mit einer guten Verteilung der Einstichpunkte erfolgen.

2.3 Einfluss des Zeitpunktes der Probenahme

2.3.1 Methoden

Die Untersuchungen wurden auf einer Schlaggruppe (Schlaggruppe 1), die aus 6 Schlägen bestand, durchgeführt. Die Schläge sind 10 ha, 13 ha, 16 ha, 20 ha, 38 ha und 38 ha groß. Sie umfassen insgesamt 135 ha. Die beiden 38 ha großen Schläge wurden im Gegensatz zu den anderen Schlägen im Sommer 2008 teilflächenspezifisch gedüngt.

Die Probenahme erfolgte in Form punktbezogener Mischproben entlang eines Kreises mit einem Durchmesser von 10 m im 1 ha-Raster zu den vier Zeitpunkten Frühjahr 2007 (PZ1), Herbst 2007 (PZ2), Frühjahr 2008 (PZ3) und Herbst 2008 (PZ4). Bestimmt wurden der pH-Wert sowie die Gehalte von P, K und Mg.

2.3.2 Ergebnisse

2.3.2.1 *Die Häufigkeitsverteilungen der Nährstoffgehalte auf der Schlaggruppe 1*

Im Frühjahr 2007, zum Zeitpunkt PZ1, waren die P-, K- und Mg-Gehalte in etwa normal verteilt (**Bild 10**). Die am häufigsten besetzte Klasse befindet sich im mittleren Bereich der gemessenen Nährstoffgehalte. Im Gegensatz dazu ist bei dem pH-Wert die höchste Klasse am stärksten besetzt. Die Mittelwerte des pH-Wertes bzw. der P-, K- und Mg-Nährstoffgehalte liegen in den für die Dawa typischen Bereichen von 6,8 bzw. 8,2, 19,6 und 7, 8 mg/100g Boden.

2.3.2.2 *Korrelationen zwischen den Nährstoffgehalten verschiedener Probenahmezeitpunkte*

Die Beziehungen zwischen den pH-Werten bzw. den Phosphorgehalten zu den verschiedenen Probenahmezeitpunkten ist bei Korrelationskoeffizienten von minimal 0,93 eng (**Bild 11**). In beiden Fällen ist der Korrelationskoeffizient zwischen den Probenahmezeitpunkten PZ1 und PZ3, also zwischen den beiden Frühjahrmessungen, am geringsten. Der vergleichsweise höhere Korrelationskoeffizient zwischen den Probenahmezeitpunkten PZ1 und PZ4 könnte auf die zwischenzeitlich erfolgte Nährstoffzufuhr zurückgeführt werden, die den bis dahin erfolgten Nährstoffaustrag teilweise wieder kompensiert haben könnte. Für diese Vermutung spricht auch, dass die Korrelation zwischen den Probenahmezeitpunkten PZ3 und PZ4 relativ gering ist.

Eine vergleichbare Tendenz gilt auch für Magnesium, wobei die minimalen Werte für die Korrelationskoeffizienten auf 0,9 zurückgehen. Für Kalium sind die Korrelationskoeffizienten generell geringer und nur beim Vergleich zwischen den Probenahmezeitpunkten PZ2 und PZ3 mit 0,95 hoch. Für die übrigen Beziehungen gelten Werte zwischen 0,89 und 0,83. Lediglich bei dem Vergleich der Probenahmezeitpunkte PZ3 und PZ4 sinken die Werte der Korrelationskoeffizienten auf 0,65 ab.

2.3.2.3 Die absoluten Abweichungen zwischen den Nährstoffgehalten verschiedener Probenahmezeitpunkte

Auf den jeweils 50 % der Probenahmeflächen, die sich am meisten gleichen (P50), variieren der pH-Wert in Abhängigkeit von dem Probenahmezeitpunkt um maximal 0,2 und die Phosphor-, Kalium- bzw. Magnesiumgehalte maximal um 0,83, 3.59 bzw. 0,36 mg/100 g Boden (**Tab. 3**).

Tabelle 3: Die absoluten Differenzen der Nährstoffgehalte zwischen den Probenahmezeitpunkten auf der Schlaggruppe 1 für 50 % (P50) bzw. 90 % (P90) der Probenahmeflächen

			PZ2-PZ1	PZ3-PZ1	PZ4-PZ1
pH-Wert	-	P50	0.10	0.10	0.20
		P90	0.40	0.50	0.40
P	mg/100g	P50	0.66	0.70	0.83
		P90	1.73	2.10	1.82
K	mg/100g	P50	3.59	3.00	2.76
		P90	7.26	8.00	6.67
Mg	mg/100g	P50	0.36	0.30	0.33
		P90	1.34	1.30	1.00

Im Wesentlichen treten die Änderungen bereits zwischen den Probenahmezeitpunkten Herbst 2007 (PZ2) und Frühjahr 2007 (PZ1) auf, bleiben im Weiteren dann aber auf diesem Niveau stehen.

Auch bei der Betrachtung von 90 % der Probenahmeflächen (P90) sind die wesentlichen Änderungen beim Vergleich der Probenahmezeitpunkte PZ1 und PZ2 zu verzeichnen. Diese Änderungen wachsen bei dem Vergleich mit den Probenahmezeitpunkten Frühjahr 2008 (PZ3) und Herbst 2008 (PZ4) kaum noch oder nur noch vergleichsweise gering an. Die Probenahmezeitpunkte PZ2 und PZ1 entsprechen einer Herbst- bzw. einer Frühjahrsbeprobung. Zwischenzeitlich fand eine Nährstoffabfuhr durch die Ernte statt. Damit ließe sich die größere Änderung erklären. Der Probenahmezeitpunkt PZ3 entspricht wieder einer Frühjahrsbeprobung bei einem vergleichbaren Nährstoffgehalt wie zum Probenahmezeitpunkt PZ2. Die Änderungen bleiben in etwa auf dem Niveau der Herbstbeprobung stehen. Die zu erwartenden größeren Änderungen zum Probenahmezeitpunkt PZ4 im nächsten Herbst mit vorangegangener erneuter Nährstoffabfuhr werden durch die zwischenzeitliche Düngung auf etwa 50 % der Schlaggruppe 1 (teilweise) kompensiert.

2.3.2.4 Die räumliche Verteilung der zu verschiedenen Probenahmezeitpunkten ermittelten Nährstoffgehalte

Zur Darstellung der räumlichen Verteilungen der Nährstoffgehalte wurden die 6 Schläge der Schlaggruppe 1 ohne Berücksichtigung ihrer wahren Lage zueinander zusammen-

gefasst (**Bild 12**). Präsentiert werden die räumlichen Verteilungen der Nährstoffgehalte aber nur für den ersten Probenahmezeitpunkt im Frühjahr 2007 (PZ1). Die Nährstoffgehalte der späteren Zeitpunkte werden als Differenzen zu den Nährstoffgehalten zum Zeitpunkt PZ1 wiedergegeben.

Eine größere Anzahl von Probenahmeflächen mit pH-Werten $>7,2$ ist umgeben von deutlich weniger Probenahmeflächen mit geringeren pH-Werten, die auf einzelnen Probenahmeflächen auf pH-Werte $< 5,0$ zurückgehen. Abweichungen $>0,45$ aufgrund einer späteren Probenahme sind eine Ausnahme. Niedrige, mittlere und hohe Phosphorgehalte sind auf der Schlaggruppe 1 relativ gleichmäßig vertreten. Die Schwankungsbreite der Wiederholungsmessungen übersteigt nur auf wenigen Probenahmeflächen den Wert von $1,5 \text{ mg}/100 \text{ g}$ Boden. Die Variabilität des Kaliumgehaltes ist relativ gering. Probenahmeflächen mit mittleren Gehalten von $14 - 22 \text{ mg}/100 \text{ g}$ Boden stehen wenige Probenahmeflächen mit größeren bzw. kleineren Gehalten gegenüber. Bis zum Probenahmezeitpunkt PZ3 nehmen die Kaliumgehalte vorrangig ab. Die Differenzen überschreiten Werte von $\pm 6 \text{ mg}/100 \text{ g}$ Boden. Auf den zwei großen, vor dem letzten Probenahmezeitpunkt PZ4 gedüngten Schlägen, ist der Düngeeffekt klar erkennbar. Auf den nicht gedüngten Schlägen nehmen die Kaliumgehalte zum Probenahmezeitpunkt PZ4 ab. Stark ist die Abnahme auf den Schlägen oben rechts und unten rechts. Die Magnesiumgehalte bewegen sich vorrangig zwischen mittleren und hohen Werten. Die Schwankungsbreite der Wiederholungsmessungen überschreitet die Werte von $\pm 0,75 \text{ mg}/100 \text{ g}$ relativ selten.

Durch die Umrechnung der Nährstoffgehalte in Gehaltsklassen ist ein Einfluss des Probenahmezeitpunktes nicht mehr eindeutig feststellbar (**Bild 13**). Rein visuell übersteigt für Phosphor und Kalium die Anzahl der Probenahmeflächen, die zu einem späteren Probenahmezeitpunkt niedriger eingestuft werden, die der höher eingestuften. Die maßgebliche Veränderung hat bereits zum Probenahmezeitpunkt PZ2 stattgefunden. Für den pH-Wert und Magnesium überwiegt dagegen zum Probenahmezeitpunkt PZ2 die Anzahl von Probenahmeflächen mit erhöhten Gehaltsklassen. Als Ursache kann für den pH-Wert vermutet werden, dass mehrere Probenahmeflächen mit pH-Werten dicht an den Klassengrenzen vorhanden waren, so dass geringe Änderungen eine veränderte Einstufung hervorgerufen haben. Diese Annahme ist berechtigt, da der mittlere pH-Wert sich während der vier Probenahmezeitpunkte kaum verändert hatte ($6,85$; $6,89$; $6,91$ und $6,89$). Die größere Anzahl an Probenahmeflächen mit höher eingestuften Gehaltsklassen für Magnesium wird dagegen durch die Zunahme der mittleren Magnesiumgehalte gestützt ($7,84$; $8,26$; $8,08$ und $8,26$).

2.3.2.5 *Der Normalfehler der Nährstoffgehalte bei variierenden Probenahmezeitpunkten*

Die Berechnung der Normalfehler erfolgte für die 135 Probenahmeflächen der 6 Schläge und für die 4 Probenahmezeitpunkte von Frühjahr 2007 bis Herbst 2008. Zum besseren Vergleich wurde die Tabelle 2 um die ermittelten Werte ergänzt (**Tab. 4**).

Tabelle 4: Normalfehler für Probenahme und Laboranalyse gemäß GRABO & PÖßNECK 2007 und gemäß eigener Untersuchungen

	Normalfehler, Variationskoeffizient, Untersuchung			
	90er Jahre ¹ %	2006 %	Probenahmevarianten 2007 %	Probenahmezeitpunkte 2007-2008 %
pH-Wert	5	2	1	2
P	20	14	27	11
K	25	13	17	18
Mg	12	8	10	7

Trotz der Probenahmen zu zeitlich versetzten Zeitpunkten sind die Normalfehler mit Ausnahme des Kaliums gleich oder kleiner als die Normalfehler, die von GRABO & PÖßNECK (2007) angegeben werden.

2.3.3 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Nährstoffgehalte bzw. Nährstoffgehaltsklassen einer Schlaggruppe zeigen bei Anwendung der gleichen Probenahmevariante (im konkreten Fall einer punktbezogenen Probenahme) und bei Analyse der Proben im gleichen Labor bei insgesamt 4 Probenahmen innerhalb eines Zeitraumes von 1,5 Jahren (Frühjahr des ersten bis Herbst des zweiten Jahres) relativ übereinstimmende Werte.

Die Normalfehler sind mit Ausnahme des Kaliums gleich bzw. kleiner als die von GRABO & PÖßNECK (2007) angegebenen mittleren Normalfehler und auch kleiner als die auf der Grundlage unterschiedlicher Probenahmevarianten (s. Pkt. 2.2) ermittelten Normalfehler. Der Einfluss des Zeitpunktes der Probenahme auf die Nährstoffgehalte ist somit vergleichsweise gering. Der Probenahmezeitpunkt kann folglich ohne wesentliche Einschränkungen in Abhängigkeit von den betrieblichen Bedingungen festgelegt werden.

Dieses Ergebnis widerlegt die vor 10 Jahren von BRENK (1999) aus einem Untersuchungsprogramm gezogene Schlussfolgerung, dass die teilflächenspezifische P- und K-Düngung auf der Basis von Nährstoffkartierungen, u. a. wegen der geringen Zuverlässigkeit der Kartierungen, nicht sinnvoll sei. Zugleich spiegeln die beiden Untersuchungsergebnisse die innerhalb eines relativ kurzen Zeitraumes erreichten Fortschritte bei der Probenahme zum Zweck der Analyse der Nährstoffgehalte wider.

3 Erzeugung von Karten

3.1 Problemstellung

Applikationskarten für die Düngung werden empfehlungsgemäß von der räumlichen Verteilung der Nährstoffe (Nährstoffverteilungskarten) abgeleitet. Folglich müssen für jede Position eines Schlages die Nährstoffgehalte oder Nährstoffgehaltsklassen bekannt sein und als Flächenkarten vorliegen. In der einfachsten Form werden gemessene Nährstoffgehalte den bekannten Probenahmeflächen zugewiesen. Alternativ werden

die Gehalte an den nicht beprobten Positionen, ausgehend von den Gehalten an beprobten Positionen, interpoliert und als Flächenkarten dargestellt.

Zuweisung

Für eine spätere Zuweisung der Nährstoffgehalte zu den Probenahmeflächen sollte die Probenahme vorzugsweise flächenbezogen innerhalb von Klassenflächen erfolgen (ANONYM 2003). Für die Abgrenzung von Klassenflächen dient die räumliche Verteilung bereits bekannter Merkmale. Dabei wird zugrunde gelegt, dass zwischen den ausgewählten Merkmalen und den Nährstoffgehalten ein Zusammenhang besteht, der dazu beiträgt, dass die Variabilität der Nährstoffgehalte innerhalb einer Klassenfläche vergleichsweise gering und zwischen den Klassenflächen dagegen hoch ist. Anstatt das Muster der räumlichen Verteilung der Nährstoffgehalte zu ermitteln, wird unterstellt, dass es dem Muster der Klassenflächen entspricht. Die Auflösung der Flächenkarte ist durch die Größe der Klassenflächen vorgegeben. Die Probenahme dient nur noch der Bestimmung des mittleren Nährstoffgehaltes der jeweiligen Klassenfläche.

Zur Ausgrenzung von Klassenflächen werden diverse Merkmale vorgeschlagen: Bodenkarten, Ertragspotential, Luftbilder, elektrische Bodenleitfähigkeit, Geländehöhe, digitales Geländemodell usw. Eher selten wird überprüft, ob die Beprobung von Klassenflächen einer reinen Rasterbeprobung tatsächlich überlegen ist.

Bei einer Untersuchung von acht Schlägen durch MALLARINO *et al.* (2004) wurden 1,2 ha- bzw. 1,6 ha-Rasterzellen, Bodenartzonen, Zonen gleicher Höhe und Managementzonen verglichen. Kein Ansatz war den anderen über alle Felder und Nährstoffe überlegen. Im Mittel schnitten die Rasterzellen und die Managementzonen am besten ab. Alle Ansätze waren für P und K weniger effizient als für pH. Eine Bodenprobenahme auf der Grundlage der elektrischen Bodenleitfähigkeit zur Bestimmung des pH-Wertes wurde befürwortet (DUNN & BEECHER 2007).

Die Nutzung von Ertragsklassenflächen war bei FLOWERS *et al.* (2005) besser oder gleich gut wie eine punktbezogene Probenahme im 98 m-Raster bzw. eine punktbezogene Probenahme im 98 m-Raster mit anschließender Interpolation mittels Kriging. Sie war fast so effektiv wie die flächenbezogene Probenahme im 98 m-Raster. Jedoch war die flächenbezogene Probenahme im 68 m-Raster der effektivste Weg, die Nährstoffvariabilität zu beschreiben.

Auf zwei von BRONSON *et al.* (2000) untersuchten Schlägen wurden keine Beziehungen zwischen Klassenflächen der Höhe und Phosphorgehalten gefunden. Eine 0,1 ha- und 0,2 ha-Rasterprobennahme war der 0,4 ha- und 0,8 ha-Rasterprobennahme und der Probenahme nach Landschafts- oder Texturmerkmalen für die Planung der teilflächen-spezifischen Düngung überlegen.

Luftbilddaten waren gemäß MAGRI *et al.* (2005) mit Nährstoffgehalten nicht gut korreliert und waren deshalb nicht nützlich, um Zonen der Bodenfruchtbarkeit zu definieren.

Schlussfolgernd wird ein rasterbasiertes Management für Kalk, Phosphor und Kalium empfohlen.

Bei der Ausgrenzung von Klassenflächen kann nicht nur ein einzelnes Merkmal, sondern eine Kombination mehrerer Merkmale berücksichtigt werden. Eine multivariate Klassifikation wurde benutzt, um Daten von zwei Schlägen zu klassieren. Die zusätzlichen Daten, Ertrag, Höhe und elektrische Bodenleitfähigkeit, schienen Bereiche im Feld zu identifizieren, wo der Boden hinreichend homogen war. Die Ergebnisse der gezielten Probenahme zeigten, dass diese Klassen genutzt werden könnten, um die zukünftige Probenahme der Schläge zu steuern (FROGBROOK & OLIVER 2007).

Schätzung/Interpolation

Ein Interpolationsverfahren ist ein statistisches Verfahren zur Schätzung von Werten an nicht untersuchten Positionen auf der Grundlage der Werte untersuchter Positionen (NIELSEN & WENDROTH 2003). Die bekannten Werte werden in Abhängigkeit von dem Abstand zur Position, deren Wert geschätzt werden soll, gewichtet. Die Interpolation erzeugt einen kontinuierlichen Übergang zwischen den Ausgangswerten. Wurden z.B. an benachbarten Positionen die Gehaltsklassen A und D ermittelt, werden in den Zwischenpositionen zusätzlich die Gehaltsklassen B und C ausgewiesen.

Voraussetzung für eine sinnvolle Interpolation ist, dass die Nährstoffgehalte an den beprobten Positionen räumlich abhängig sind und die analysierten Nährstoffgehalte nicht Flächen, wie bei der Zuweisung, sondern einzelnen Positionen zugewiesen werden. Als Position wird im Allgemeinen der Mittelpunkt der Einstichpunkte einer Mischprobe gewählt. GRABO & PÖSSNECK (2007) weisen darauf hin, dass die Analysewerte nicht für irgendeinen Mittelpunkt des Rasters, sondern für das räumliche Gebilde aller Einstichpunkte gelten. Sie schlagen deshalb vor, die Analysewerte mehreren Einstichpunkten zuzuordnen.

Zur Prüfung der räumlichen Abhängigkeit benutzt man in der Geostatistik so genannte Semivariogramme (**Bild 14**). Grundlage eines Semivariogramms sind die Differenzen zwischen Beobachtungspaaren (Nährstoffgehalten), die eine bestimmte Distanz (lag) h voneinander entfernt sind. Je enger die Positionen der Nährstoffgehalte benachbart sind, desto geringer ist im Durchschnitt die Differenz der Nährstoffgehalte. Mit zunehmendem Abstand der betrachteten Positionen zueinander steigt die durchschnittliche Differenz der Nährstoffgehalte an und nähert sich häufig einem Höchstwert. Der für eine einzelne Distanzklasse (zusammengefasste Distanzen innerhalb eines Distanzintervalls) berechnete Wert wird als (empirische) Semivarianz bezeichnet. Seine Darstellung in Abhängigkeit von der Distanz h ist das empirische Semivariogramm. Semivarianzen unterschiedlicher Merkmale lassen sich leichter in Form der standardisierten Semivarianzen vergleichen. Dazu werden die Semivarianzen durch die Varianz aller Daten dividiert.

Häufig tritt das Semivariogramm in einer speziellen Form, dem begrenzten Semivariogramm, auf (**Bild 14**). Dieses lässt sich durch eine Funktion mit wenigen Parametern,

dem Semivariogramm-Modell, beschreiben. Der Wert c_0 wird als Nuggetvarianz bezeichnet. Diese wird durch die kleinräumige Variabilität verursacht, die kleiner als die kleinste Beprobungsdistanz ist oder durch Messfehler. Die Reichweite (engl. Range) ist die maximale Distanz, über welche Beobachtungspaare korreliert bleiben, also räumlich abhängig sind. Der Schwellenwert (engl. Sill) ist der maximale Wert, der bei einem begrenzten Semivariogramm auftritt. Die (räumliche) (Varianz-)Struktur eines Semivariogramms ist die Form und die Art der Kurve für Werte, die größer als die Nuggetvarianz sind (NIELSEN & WENDROTH 2003). Aus der Differenz von Sill und Nugget, der „Geostruktur“, leitet HERBST (2002) den empfohlenen Abstand für die Probenahme für die direkte Interpolation ab. Sie sollte einer Distanz entsprechen, die 50 %, bevorzugt 70 %, der Geostruktur gleichsteht. Mit anderen Worten ausgedrückt: der Abstand zwischen den Probenahmepunkten sollte gleich oder kleiner als der halbe Rangewert sein.

Die Ausprägung der räumlichen Abhängigkeit der Daten wird durch das Nugget-Sill-Verhältnis (Nugget dividiert durch den Sill) beschrieben. Bei Verhältnissen $\leq 0,25$ besteht eine starke, bei Verhältnissen zwischen 0,25 und 0,75 eine moderate und bei Verhältnissen $> 0,75$ eine schwach ausgeprägte räumliche Abhängigkeit (CAMBARDELLA *et al.* 1994).

Ein vielseitig anwendbares Interpolationsverfahren ist das Kriging, das für die Schätzung die räumliche Varianzstruktur, die sich aus den Semivariogrammen ergibt, verwendet (NIELSEN & WENDROTH 2003). Weist das Semivariogramm eine große Nuggetvarianz und kaum eine räumliche Struktur auf, was durch zu große Probenahmeabstände verursacht wird, kann jedoch auch durch Kriging keine zuverlässige Interpolation ausgeführt werden. Der Anwender erkennt dies aber bereits am empirischen Semivariogramm oder am Semivariogramm-Modell und wird auf eine Interpolation verzichten.

CHANG *et al.* (1999) ermittelten Semivariogramme für unterschiedliche Probenahmeraster und unterschiedliche Anfangspunkte des Rasters auf dem Schlag. Nur bei dem kleinen Probenahmeraster, das zu Semivariogrammen mit einer großen räumlichen Struktur führte, waren die Semivariogramme unabhängig von der Lage des Probenahmerasters. Die Interpolationsergebnisse waren folglich immer gleich. Größere Probenahmeraster erzeugten dagegen Semivariogramme mit geringer räumlicher Struktur, die sich zusätzlich in Abhängigkeit von der Lage des Probenahmerasters veränderten. Dies führte trotz des gleichen Probenahmerasters zu unterschiedlichen Interpolationsergebnissen.

Es ist folglich ein Irrtum anzunehmen, dass durch die Interpolation eine unzureichende Probenahmedichte ausgeglichen werden kann (WOLLENHAUPT *et al.* 1994, ANONYM 2003).

KERRY & OLIVER (2005, 2008) ermittelten außerdem, dass für ein stabiles Semivariogramm und somit eine zuverlässige Interpolation nicht weniger als 100 Daten vorliegen sollten. Selbst bei einer Probenahme im 1 ha-Raster würde dies eine Schlaggröße von 100 ha voraussetzen. Bei Anwendung spezieller Methoden kann die Zahl der not-

wendigen Daten auf 50 – 60 reduziert werden. Im Bereich der Landwirtschaft wird auch diese Bedingung nur selten erfüllt sein.

Spezielle Varianten des Kriging sind das Co-Kriging sowie das Kriging mit external drift (KED). Durch beide Varianten soll die Schätzgenauigkeit für ein weniger intensiv beprobtes Merkmal (z.B. einen Nährstoffgehalt) erhöht werden, indem räumliche Daten eines zusätzlichen, dichter beprobten Merkmals (Kovariable) in die Interpolation einbezogen werden. Dieses Ziel wird desto sicherer erreicht, je stärker das zu interpolierende Merkmal und die Kovariablen korreliert sind. Als Kovariable können diejenigen Merkmale dienen, die auch zur Ausgrenzung der Klassenflächen herangezogen werden.

Von KOZAR *et al.* (2002) wurden Phosphor- und Kaliumgehalte einer punktbezogenen Probenahme im 100 m-Raster gekrigt (univariat, ohne zusätzliche Daten) und zusätzlich co-gekrigt (multivariat) unter Berücksichtigung eines hoch aufgelösten digitalen Höhenmodells. Die durchschnittliche Schätzvarianz des Co-Kriging konnte relativ zum Kriging gesenkt werden.

Das Kriging ist nur in höherwertigen GIS-Programmen implementiert und steht somit nur Profis zur Verfügung. Dies ist auch sinnvoll, da die Anwendung des Kriging Expertenwissen erfordert.

In betrieblichen GIS-Programmen ist häufig ein einfaches Schätzverfahren, wie das Inverse Distance Weighting (IDW), implementiert. Seine Ausführung ist programmtechnisch an keine Voraussetzungen geknüpft, so dass sich Flächenkarten beliebiger Auflösung erzeugen lassen. Es liegt in der Verantwortung des Anwenders, die Interpolation nur zu nutzen, wenn die Ausgangsdaten noch räumlich abhängig sind. Wird diese Verantwortung nicht wahrgenommen, werden hoch aufgelöste Flächenkarten, die eine hohe Genauigkeit vortäuschen, erzeugt, die der Realität nicht entsprechen. Konsequenterweise wären sie sofort zu verwerfen. Der Anwender kann sich vor stark fehlerhaften Flächenkarten nur schützen, indem er seine Daten mittels externer Angaben zur räumlichen Abhängigkeit der Nährstoffe vorab überprüft, den Empfehlungen für das erforderliche Probenahmeraster folgt oder grundsätzlich auf die Interpolation verzichtet, sofern keine Informationen zur räumlichen Abhängigkeit der Daten vorliegen.

Bei einer Probenahme im 100 m-Raster in China ermittelten GUOSHUN *et al.* (2008) noch eine moderate räumliche Abhängigkeit, gemessen als Nugget-Sill-Verhältnis, von 30 – 50 % für verfügbares Phosphor. Dagegen ist Phosphor unter vielen Bedingungen Irans nur über relativ geringe Distanzen noch räumlich korreliert. Der Range betrug ca. 50 m (YASREBI *et al.* 2008). In Deutschland reichte HERBST *et al.* (2008) eine Probenahme im 100 m-Raster nicht mehr aus, um für Phosphor ein Variogramm zu erstellen. Folglich konnte kein Range bestimmt werden. Nach Untersuchungen auf unterschiedlichen Böden in Deutschland lagen die Reichweiten für räumliche Abhängigkeiten bei den Grundnährstoffen meist unter 70 m (HERBST 2005).

Aus den geringen Reichweiten für die räumliche Abhängigkeit der Nährstoffe, insbesondere von Phosphor, ergeben sich hohe Anforderungen an die Probenahme. Die

Probenahmedichte sollte unter günstigsten Bedingungen maximal 100 m bzw. 1 ha betragen und unter ungünstigen Bedingungen auf 30 m, höchsten 50 m abgesenkt werden (ANONYM 2003). Bei einer flächenbezogenen Probenahme sollte die Größe der Probenahmeflächen bei 0,25 – 0,50 ha liegen (AUTORENKOLLEKTIV 2000). Für die jeweils untersuchten Gebiete sollte die Distanz zwischen den Probenahmepunkten 90 m nicht überschreiten (WOLLENHAUPT *et al.* 1994) bzw. bei 30 – 60 m liegen (TABI & OGUNKUNLE 2007).

Untersuchungen von LAUZON *et al.* (2005) in Ontario ergaben, dass 13 von 23 Feldern ein Probenahmeraster von weniger als 30 m erfordert hätten, um die räumliche Verteilung von Phosphor adäquat abzubilden. Nur für ein Feld wäre das 100 m-Raster hinreichend gewesen.

Die oben genannten Untersuchungen hatten das Ziel, die räumliche Abhängigkeit der Nährstoffe im Hinblick auf eine teilflächenspezifische Düngung zu ermitteln. Wird das Probenahmeraster extrem verkleinert (<10 m), können die zugehörigen Semivariogramme noch wesentlich kleinräumigere Abhängigkeitsstrukturen anzeigen (z.B. SOLIE *et al.* 1999). Diese spiegeln die kleinräumige Variabilität wider, auf die die Düngung jedoch nicht reagieren kann und die folglich in diesem Zusammenhang uninteressant ist.

Eigene Untersuchungen wurden durchgeführt, um Varianten der Erstellung von Flächenkarten auf der Grundlage unterschiedlicher Probenahmevarianten werten zu können.

3.2 Basisvarianten zur Erzeugung von Karten

3.2.1 Methoden

Es wurden 3 Varianten für die Interpolation von Nährstoffgehalten mittels Inverse Distance Weighting (IDW) und 1 Variante für die Zuweisung von Nährstoffgehalten untersucht, um Flächenkarten für den pH-Wert und die P-, K- und Mg-Gehalte für zwei Schläge (Siegrennbreite und Sandberg) zu erzeugen. Zugrunde gelegt wurden 1 ha-, 3 ha- und 9 ha-Probenahmeflächen (**Bild 15**). Als Analysewerte dienten die Probenahmeergebnisse gemäß Punkt 2.2.

In der Generierungsvariante GV1 wurden die Analysewerte der punktbezogenen Probenahme (PV1) dem jeweiligen Mittelpunkt der Probenahmefläche zugeordnet (**Bild 16**). In der Generierungsvariante GV2 wurden die Analysewerte der flächenbezogenen Probenahme (PV3) dem jeweiligen Mittelpunkt der Probenahmefläche zugeordnet (Einpositionsvariante). Für die Generierungsvarianten GV3 und GV4 erfolgte für die 3 ha- und 9 ha-Probenahmeflächen vorab die Berechnung eines Mittelwertes aus den Daten der 1 ha-Probenahmeflächen. In der Generierungsvariante GV3 wurden die Analysewerte der flächenbezogenen Probenahme (PV3) gemäß dem Vorschlag von GRABO & PÖßNECK (2007) mehreren Punkten der Probenahmefläche zugeordnet (Mehrpositionsvariante). Bei den beiden größeren Probenahmeflächen sind dies die jeweiligen Mittelpunkte der 1 ha-Probenahmeflächen. Für die 1 ha-Probenahmeflächen sind dies Positionen

einzelner Einstiche. In der Generierungsvariante GV4 wurden die Analysewerte der flächenbezogenen Probenahme den Probenahmeflächen direkt zugewiesen (Zuweisungsvariante).

Zur Bewertung der Erzeugung flächendeckender Karten durch Interpolation bzw. Zuweisung wurde der mittlere absolute Fehler (MAE), die mittlere absolute Abweichung zwischen geschätzten und gemessenen Werten, berechnet. Der MAE entspricht der Summe der absoluten Differenzen, geteilt durch die Anzahl der Daten (NIELSEN & WENDROTH 2003). Als Messwerte (Verifizierungsdaten) dienten auf der Siegrennbreite die Analyseergebnisse einer punktbezogenen Probenahme im 50 m-Raster (0,25 ha), die zeitgleich mit der 1 ha-Probenahme erfolgt war. Auf dem Sandberg wurden als Verifizierungsdaten die Messwerte an Positionen der 1 ha-Probenahme, die für die Interpolation nicht benötigt wurden, verwendet. Da somit für die Interpolation bzw. Zuweisung der 1 ha-Probenahmevariante keine Verifizierungsdaten zur Verfügung standen, musste auf sie verzichtet werden.

3.2.2 Ergebnisse

Die Nährstoffversorgung der beiden Untersuchungsschläge wurde bereits im Pkt. 2.2 diskutiert (**Bild 3**).

In Abhängigkeit von der Variante der Interpolation oder Zuweisung bzw. der Größe der Probenahmefläche entstehen sich unterscheidende Flächenkarten der Verteilung der Nährstoffe. Diese werden beispielhaft für den Schlag Siegrennbreite für den Phosphorgehalt dargestellt (**Bild 17**). Die Klassierung entspricht der Einteilung der Phosphorgehalte in die Phosphorgehaltsklassen. Die Auflösung der Flächenkarten entspricht einem 50 x 50 m-Raster.

Die Zuweisungsvariante GV4 erzeugt zwangsweise Verteilungen, die der Einteilung des Schlages in Probenahmeflächen entsprechen. Durch die Interpolation werden diese starren Grenzen aufgebrochen. Die interpolierten Grenzen orientieren sich an der vorgegebenen Auflösung des 50 m-Rasters.

Die Interpolation bezieht in die Schätzung des Gehaltes an einer Position auch die Gehalte weiter entfernt liegender Positionen, wenn auch mit einer geringeren Wichtung, ein. Das führt zu abweichenden Verteilungen von der Zuweisung. Diese Abweichungen werden reduziert, wenn für die Interpolation die gleichen Analysewerte innerhalb einer Probenahmefläche mehreren Positionen zugeordnet werden (Mehrpositionsvariante GV3).

Die Analysewerte der punktbezogenen Probenahme (Variante GV1) variieren stärker als die der flächenbezogenen Probenahme (Variante GV2). Das spiegelt sich auch in den interpolierten Verteilungen wider.

Mit der Vergrößerung der Probenahmefläche erfolgt eine zunehmende Mittelwertbildung der tatsächlich vorhandenen Nährstoffgehalte. Die Spannweite der ausgewiesenen Nährstoffgehalte nimmt ab.

Die Darstellung der Muster offenbart, wie entscheidend die Probenahmevariante und die Interpolation bzw. Zuweisung die Verteilung des Nährstoffgehaltes und damit die Applikationskarte für die Düngung beeinflussen können. Aus den Mustern kann aber nicht ihr Wahrheitsgehalt abgeleitet werden. Erst die Berechnung des Fehlers der Interpolation bzw. Zuweisung an den Positionen der Validierungsdaten zeigt an, welche der untersuchten Varianten zur Erzeugung einer Flächenkarte der Nährstoffgehalte zuverlässigere Karten liefert (**Bild 18**).

Auf der Abszisse sind aufeinanderfolgend die vier Generierungsvarianten für die 3 Probenahme-flächengrößen dargestellt. Die vollständige Palette der Varianten auf der Siegre-nnbreite wird ergänzt durch die aufgrund der eingeschränkten Datenbasis noch sinn-vollen Varianten auf dem Sandberg. Es gibt eindeutige Unterschiede zwischen den un-tersuchten Varianten, doch ist der Fehler selbst in der günstigsten Variante noch relativ hoch. Letzterer lässt sich maximal auf 60 % des maximalen Fehlers reduzieren (pH-Wert und Magnesiumgehalt auf der Siegre-nnbreite). Im Mittel aller Nährstoffgehalte er-gibt sich eine mögliche Reduktion des Fehlers auf der Siegre-nnbreite auf 70 % und auf dem Sandberg auf 80 % des maximalen Fehlers.

Auf der Siegre-nnbreite steigt der mittlere absolute Fehler von der Flächengröße 1 ha zur Flächengröße 9 ha an. Innerhalb der gleichen Flächengröße nimmt der Fehler im Allgemeinen von der Generierungsvariante GV1 (Interpolation von Analysedaten einer punktbezogenen Probenahme) in Richtung der Generierungsvarianten GV3 bzw. GV4 ab. Die Mehrpositionsvariante GV3 ergibt im Mittel aller Varianten die geringsten abso-luten Fehler. Die Zuweisungsvariante GV4 ist aber hinsichtlich der Genauigkeit eben-bürtig.

Die Unterschiede zwischen den Generierungsvarianten sind auch von dem Nährstoff abhängig. Der Variationskoeffizient aller mittleren absoluten Fehler eines Nährstoffes beträgt für den pH-Wert und den Magnesiumgehalt etwa 15 % und sinkt für den Kali-umgehalt auf 6 % ab. Der geringe Variationskoeffizient bedeutet, dass der Fehler durch die untersuchten Varianten nicht wesentlich beeinflusst werden konnte.

Die Untersuchungen auf dem Sandberg bestätigen in der Tendenz die Beobachtungen auf der Siegre-nnbreite, obwohl die Höhe der mittleren absoluten Fehler nicht vergleich-bar ist.

3.2.3 Diskussion und Schlussfolgerungen

Flächenkarten, denen Analysedaten zugrunde liegen, die auf Probenahme-flächen von 1 ha und größer ermittelt wurden, weisen noch relativ hohe Fehler auf. Ein äußeres Zei-chen für die ungenügende Zuverlässigkeit der Flächenkarten ist die von der Art der Er-zeugung und der Größe der Probenahme-fläche verursachte große Variabilität der Kar-

ten. Durch die Art der Erzeugung der Flächenkarten, Interpolation oder Zuweisung, kann dieser Sachverhalt nicht grundsätzlich verändert werden. Trotzdem bestehen zwischen ihnen Unterschiede.

Eine punktbezogene Probenahme und die Zuordnung der Analysedaten zur mittleren Probenahmeposition (Generierungsvariante GV1) ist die standardmäßige Ausgangssituation für eine Interpolation. Ausgehend von den Werten an den beprobten Positionen werden die Werte an nicht beprobten Positionen durch die Interpolation geschätzt. Die geringe Qualität der interpolierten Daten im untersuchten Beispiel wird durch den zu großen Abstand zwischen den beprobten Positionen verursacht, durch den eine Voraussetzung der Interpolation, die räumliche Abhängigkeit der Analysedaten, nur noch eingeschränkt gewährleistet ist.

Eine flächenbezogene Probenahme mit anschließender Zuordnung der Analysedaten zum Mittelpunkt der Einstichpositionen (Einpositionsvariante GV2) bietet eigentlich keine Voraussetzung für eine Interpolation. Da die Mischproben bereits die komplette Probenahmeflächen repräsentieren, gibt es keine unbekannten Positionen, für die Werte geschätzt werden sollten. Werden die Analysedaten einer flächenbezogenen Probenahme dagegen als geschätzte Analysedaten einer punktbezogenen Probenahme am Mittelpunkt der Einstichpositionen betrachtet, erhält die Interpolation wieder Sinn. Es ergibt sich der Vorteil, dass die kleinräumige Variabilität der Nährstoffe unterdrückt wird. Der große Abstand zwischen den beprobten Positionen bleibt erhalten.

Eine flächenbezogene Probenahme mit anschließender Zuordnung der Analysedaten zu mehreren Einstichpositionen (Mehrpositionsvariante GV3) ist grundsätzlich ähnlich wie die Einpositionsvariante GV2 zu bewerten. Trotzdem unterscheidet sie sich von ihr. Die größere Anzahl der für die Interpolation zur Verfügung stehenden Positionen entspricht faktisch einer Erhöhung der Probenahmedichte. Wie im Fall der Einpositionsvariante GV2 werden diesen Positionen aber nicht akkurate Analysewerte, sondern Schätzwerte in Form mittlerer Analysewerte der Probenahmefläche zugeordnet. Die vergleichsweise geringen Schätzfehler der Interpolation belegen, dass dieser Kompromiss eine akzeptable Lösung darstellt.

Eine simple Zuweisung (Zuweisungsvariante GV4) zur Erstellung von Flächenkarten ist unabhängig von der räumlichen Abhängigkeit der Analysewerte und somit von der Größe der Probenahmeflächen bzw. des Probenahmerasters. Ihre Schätzgüte ist im Mittel nicht wesentlich geringer als die der Mehrpositionsvariante GV3. Ihr Nachteil besteht in den ausgewiesenen krassen Übergängen an den Grenzen der Probenahmeflächen. Diese werden allerdings durch die Trägheit der Steuerung der Düngerstreuer bei der Anpassung an veränderte Ausbringmengen auf den Schlägen nicht realisiert.

Sofern eine räumliche Abhängigkeit der Analysewerte nicht erwartet werden kann, sollte zur Erstellung von Flächenkarten die simple Zuweisung und statt einer punkt- eine flächenbezogene Probenahme gewählt werden. Gleichwertig zur Zuweisung ist die Interpolation der Analysedaten in Form der Mehrpositionsvariante.

Die Ergebnisse bestätigen die Aussagen in der veröffentlichten Literatur, dass die Interpolation von Analysedaten punktbezogener Probenahmen Probenahmeraster von kleiner 1 ha erfordern.

3.3 Einfluss der Größe sowie der Lage des Probenahmerasters

3.3.1 Methoden

Eine Interpolation von Daten punktbezogener Probenahmen lässt zuverlässige Schätzungen nur erwarten, wenn die Daten eine hinreichende räumliche Abhängigkeit aufweisen. Da diese mit zunehmendem Rasterabstand der Probenahme sinkt, entscheidet das Probenahmeraster über die erreichbare Schätzgüte. Verschiedene Probenahmeraster waren zu untersuchen.

Die Untersuchungen wurden für den Schlag Siegrennbreite durchgeführt. Als Grundlage diente der Datensatz, der im 50 m-Raster punktbezogen ermittelt worden war. Verglichen wurden das 50 m-Raster (0,25 ha), vier 100 m-Raster (1 ha), vier 150 m-Raster (2,25 ha) sowie vier 200 m-Raster (4 ha) für den pH-Wert und die P-, K- und Mg-Gehalte. Die größeren Raster entstanden durch Ausdünnen der Daten des 50 m-Rasters (**Bild 19**). Zusätzlich wurden durch eine Verschiebung des Startpunktes der größeren Raster um jeweils 50 m innerhalb einer 100 x 100 m-Zelle jeweils vier Untervarianten untersucht. Zur Verifizierung der Interpolation diente der Datensatz, der im 100 m-Raster punktbezogen ermittelt worden war (**Bild 20**). Die Interpolation erfolgte unter Nutzung der Verfahren Inverse Distance Weighting (IDW) und Kriging.

3.3.2 Ergebnisse

Als Voraussetzung für das Kriging waren die Semivariogramme zu erstellen. Die Nuggetvarianz der standardisierten Semivariogramme aller Nährstoffe des 50 m-Rasters stellt sich einheitlich bei einem Wert von etwa 0,6 – 0,7 ein (**Bild 21**, links). Phosphor und Kalium weisen eine ausgeprägte räumliche Struktur, einen großen Abstand zwischen dem Nugget und dem Sill, auf. Der Range wird bei beiden Parametern bei ungefähr 120 m erreicht. Bis zu dieser Distanz besteht ein räumlicher Zusammenhang der Daten. Für den pH-Wert und Magnesium hingegen deutet die Semivarianzkurve auf dieser Maßstabsebene eine schwächere räumliche Struktur an, die jedoch über eine weitere Distanz wirkt. Der Range wird erst bei 150 bis 200 m erreicht. Aufgrund des flachen Verlaufs der Semivarianzkurven ist der Range schwierig einzugrenzen.

Das **Bild 21** (rechts) enthält die Semivariogramme für den Phosphorgehalt in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Beprobungsabständen. Der Vergleich zeigt, dass schon die Daten des 100 m-Rasters kaum noch in der Lage sind, die räumliche Struktur des 50 m Rasters wiederzugeben. Nur ein kleiner Bereich der Kurve steigt noch an und deutet eine schwache räumliche Struktur an. Für das 150 m- und 200 m-Raster ist visuell keine räumliche Struktur aus den Semivariogrammen mehr ableitbar und die dargestellten Kurven folgen zufälligen Schwankungen. Ursache ist neben dem größeren Pro-

benahmeraster auch die geringe Anzahl der verbleibenden Werte, die keine sichere Erstellung der Semivarianzkurven mehr zulässt. Das Kriging der Daten des 100 m-Rasters ist unter Vorbehalt noch möglich, das des 150 m- und 200 m-Raster aufgrund nur noch zu ratender Parameter der räumlichen Struktur jedoch abzulehnen. Im Gegensatz dazu lässt sich die Interpolation mittels IDW programmtechnisch für alle Raster problemlos durchführen, obwohl sie für das 150 m- und 200 m-Raster gleichfalls kein vernünftiges Ergebnis mehr liefern kann.

Die Flächenkarten aller Nährstoffgehalte, welche mittels Kriging unter Verwendung der Semivarianzkurven des 50 m-Rasters erzeugt wurden, zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Originalwerten des 50 m-Rasters (**Bild 22**). Sie offenbaren zugleich die sich unterscheidenden Verteilungsbilder der Nährstoffe. Aufgrund ihrer geringen Ähnlichkeit kann aus einem kaum auf einen anderen geschlossen werden.

Trotz der Vorbehalte gegen eine Interpolation der Daten der größeren Probenahmeraster wurde der Phosphorgehalt auf der Basis aller Probenahmeraster als 50 x 50 m-Raster dargestellt (**Bild 23**). Unterstellt man die Verteilung auf der Grundlage des 50 m-Probenahmerasters als wahr, so ist der Wahrheitsgehalt der auf dem 150 m- und 200 m-Raster basierenden Verteilungen trotz der 50 m-Auflösung verschwindend gering.

Die Auswirkung der Verwendung von Daten eines zu groben Probenahmerasters auf das Interpolationsergebnis zeigt sich auch, wenn die interpolierten P-Gehaltsklassen des 100 m- bzw. 200 m-Probenahmerasters mit denen des 50 m-Probenahmerasters verglichen werden (**Bild 24**). Die relativ gleichmäßige Belegung der Gehaltsklassen B bis E mit den interpolierten Werten, basierend auf dem 50 m-Probenahmeraster, wird durch die Interpolation, basierend auf den größeren Probenahmerastern, zugunsten der Gehaltsklassen C und D verändert. Die Belegung der Gehaltsklassen B und E geht gegen Null. Das Ergebnis auf der Grundlage des 200 m-Probenahmerasters ähnelt bereits stark dem Schlagdurchschnitt, d.h. der alleinigen Belegung der Gehaltsklasse D.

Die Vorgabe eines Probenahmerasters für die Probenahme gewährleistet noch nicht zwangsläufig, dass bei einer wiederholten Probenahme die Interpolation zu gleichen Verteilungen führt. Je nachdem, an welche Position des Schlages der Startpunkt des 100 m-Rasters gelegt wird, entstehen einander ähnelnde, aber trotzdem voneinander abweichende Verteilungsbilder (**Bild 25**).

Der Anschein einer abnehmenden Zuverlässigkeit der geschätzten Werte, wenn das zugrunde liegende Probenahmeraster größer wird, lässt sich durch die Berechnung des mittleren absoluten Fehlers quantitativ untermauern (**Bild 26**).

Der Interpolationsfehler auf der Basis des 50 m-Rasters ist für alle Nährstoffgehalte am geringsten. Für den pH-Wert und den Phosphorgehalt steigt der Fehler mit der Vergrößerung des Rasters kontinuierlich an. Für die Kalium- und Magnesiumgehalte sind die Unterschiede zwischen den größeren Rastern nicht mehr ausgeprägt. In diesem Ergebnis spiegeln sich die unterschiedlichen Formen der Semivarianzkurven wider, die zur

gleichen Gruppenbildung führten. Diese allgemeine Einschätzung wird überlagert durch den Einfluss der Position des Startpunktes des jeweiligen Rasters auf dem Schlag. In Abhängigkeit von dem Startpunkt kann das gleiche Raster zu unterschiedlichen Fehlern führen. Günstige Startpunkte des größeren Rasters ergeben Fehler, die unter denen des kleineren Rasters liegen können. Ein Unterschied zwischen den beiden angewendeten Interpolationsverfahren ist nicht erkennbar. In Abhängigkeit von der jeweiligen Faktorenkombination liefern die Interpolationsverfahren wechselseitig die jeweils geringeren Fehler.

Zumindest auf diesem Schlag wäre ein Probenahmeraster < 100 m erforderlich, um die Nährstoffverteilung zuverlässig schätzen zu können.

3.3.3 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Qualität von Karten der Nährstoffverteilung hängt direkt von dem Raster der Probenahme ab. Für den untersuchten Schlag ergab sich bei punktbezogener Probenahme für Phosphor ein Range von 120 m. Dieser ist im Vergleich zu Werten, die in der Literatur genannt werden, bereits als hoch einzustufen. Das empfohlene Probenahmeraster von überschlägig der Hälfte des Ranges beträgt ≤ 60 m (HERBST 2002). Die durchgeführte Probenahme in einem 50 m-Raster hat dieser Empfehlung entsprochen. Die ausgeprägte räumliche Struktur der aus den Daten des 50 m-Rasters abgeleiteten Semivariogramme und die gute Übereinstimmung der gekrigten Nährstoffverteilung mit den Originalwerten des 50 m-Rasters belegen, dass die Empfehlung richtig gewesen wäre.

Mit größer werdenden Probenahmerastern ist die räumliche Abhängigkeit der Daten immer schlechter zu beobachten. Ist diese nur noch gering oder nicht mehr vorhanden, lässt sich eine vertretbare Interpolation mittels Kriging nicht mehr durchführen. Eine Interpolation mittels IDW ist zwar weiterhin möglich, aber sinnlos. Die Ergebnisse weichen von der Realität ab und erwecken nur scheinbar den Eindruck einer kleinräumig ermittelten Nährstoffverteilung. In Wirklichkeit werden Werte geschätzt, die im Bereich der mittleren Nährstoffgehalte des Schlages liegen.

Eine routinemäßige Interpolation ohne Kenntnis der räumlichen Abhängigkeit der Daten sollte unterbleiben.

3.4 Vergleich von Rasterflächen mit Klassenflächen

3.4.1 Vergleich auf Schlagebene

3.4.1.1 Methoden

Zur Abgrenzung von Klassenflächen wird bevorzugt die elektrische Bodenleitfähigkeit verwendet. Diese lässt sich kleinräumig mit hoher Produktivität erfassen. Da sie u. a. vom Tongehalt des Bodens abhängt, wird sie als Parameter der Bodentextur betrachtet. Damit lässt sich unterstellen, dass Beziehungen zur räumlichen Verteilung der Nährstoffe bestehen. Die Hypothese war zu untersuchen.

Die Untersuchungen fanden für die beiden Schläge Siegrennbreite und Sandberg statt. Für beide Schläge lagen Kartierungen der elektrischen Bodenleitfähigkeit mit dem Gerät EM38 im vertikalen Dipolmodus aus dem Frühjahr 2001 vor. Die Aufbereitung der Daten hatte im Wesentlichen schon vorab im Rahmen des low-input Projektes stattgefunden (DOMSCH *et al.* 2004). Mittels einer Funktion von DURRESSER (1999) waren diese auf eine Bodentemperatur von 25°C korrigiert worden. Sie dienten als Grundlage für die Ausgrenzung der Klassenflächen. Analog zur Einteilung beider Schläge in 3 ha und 9 ha Rasterflächen (Pkt. 3.2) wurden in etwa gleich große Klassenflächen der elektrischen Bodenleitfähigkeit generiert.

Die Daten wurden mittels Inverse Distance Weighting (IDW) interpoliert bzw. direkt den Flächen zugewiesen. Die Generierungsvarianten entsprachen denen im Punkt 3.2. Für die Einpositionsvariante GV2 lieferte eine etwa in der Mitte der Teilfläche befindliche 1 ha-Probenahmefläche sowohl den Nährstoffgehalt wie auch die Position. Für die Generierungsvarianten GV3 und GV4 erfolgte vorab die Berechnung eines Mittelwertes aus den Daten der 1 ha-Probenahmeflächen. Als Positionen für die Mehrpositionsvariante GV3 wurden die Mittelpunkte aller eingeschlossenen 1 ha-Probenahmeflächen verwendet. Die Zuweisungsvariante GV4 weist die gemittelten Nährstoffgehalte den Teilflächen der elektrischen Bodenleitfähigkeit direkt zu.

Die Flächenkarten wurden für den pH-Wert sowie die P-, K. und Mg-Gehalte erstellt. Die Bestimmung der Güte der Interpolation/Zuweisung erfolgte durch die Berechnung des mittleren absoluten Fehlers (MAE). Sie erfolgte analog zur Berechnung des MAE der Rasterflächen (Pkt. 3.2), d.h. auch unter Nutzung des gleichen Verifizierungsdatensatzes. Damit konnte die Probenahme auf der Grundlage der Klassenflächen direkt mit der auf der Grundlage der gleichgroßen Rasterflächen verglichen werden.

3.4.1.2 Ergebnisse

Die Siegrennbreite ist durch drei sich deutlich unterscheidende Zonen der elektrischen Bodenleitfähigkeit geprägt (**Bild 27**, rechts). Eine Zone geringer Leitfähigkeit dehnt sich in der Mitte des Schlages vom Nord- bis zum Südrand aus. Vom Mittelpunkt des Schlages erstreckt sich in nordwestlicher Richtung eine Zone hoher Leitfähigkeit. Die restlichen Schlagbereiche können zu einer Zone bzw. zwei Zonen mittlerer Leitfähigkeit zusammengefasst werden. Diese Einteilung erzeugt Teilflächen von etwa 9 ha Größe. Um Teilflächen von etwa 3 ha Größe zu generieren, erfolgt im Wesentlichen eine feinere Untergliederung dieser 9 ha-Teilflächen (**Bild 27**, links).

Abhängig von der Größe der Teilflächen und der Generierungsvariante wurden die Phosphorgehalte bzw. Phosphorgehaltsklassen dargestellt (**Bild 28**). Das Verteilungsmuster der Zuweisungsvariante GV4 folgt der Einteilung des Schlages in Klassenflächen. Gleiche Leitfähigkeiten führen aber nicht generell zu gleichen P-Gehaltsklassen.

Die Einpositionsvariante GV2 erzeugt insgesamt noch drei Gehaltsklassen. Die kleinräumige Variabilität wird noch nicht völlig unterdrückt. Wird dagegen von einem reprä-

sentativen mittleren Phosphorgehalt der gesamten Teilfläche ausgegangen (GV3), erfolgt eine Einschränkung auf nur noch zwei Gehaltsklassen. Durch die einfache Zuordnung der Gehaltsklassen der Nährstoffe zu den Teilflächen bleibt eine größere Variabilität erhalten.

Von wenigen Ausnahmen abgesehen, ist die Probenahme auf der Grundlage der Klassenflächen (gezielte Beprobung) der Probenahme auf der Grundlage der etwa gleichgroßen Rasterflächen auf der Siegrennbreite bei allen Nährstoffen überlegen (**Bild 29**). Die Fehler der Interpolation sind niedriger bzw. gleich hoch. Auf dem Sandberg trifft diese Aussage nur für den Phosphorgehalt zu, während für Kalium und Magnesium die höheren Fehler durch die gezielte Probenahme entstehen. Die Fehlerdifferenzen zwischen beiden Probenahmevarianten sind jedoch gering.

3.4.2 Vergleich innerhalb einer Region

3.4.2.1 Methoden

Die Klassenflächen von Bodenmerkmalen dehnen sich häufig über Schlaggrenzen hinweg aus. Sie charakterisieren vielfach durch natürliche Ereignisse entstandene räumliche Verteilungen, die relativ unabhängig von Besitzgrenzen sind. Zu untersuchen war, ob ganze Regionen, also Aggregationen von Schlägen, als eine Einheit hinsichtlich der Nährstoffverteilung betrachtet werden können.

Für diese Untersuchung wurde die Region in etwa 4 ha große Rasterflächen und Klassenflächen der elektrischen Bodenleitfähigkeit unterteilt. Die Region (Schlaggruppe 2) bestand aus 8 Schlägen mit einer Gesamtfläche von 425 ha. Die Interpolation der Flächenkarten des pH-Wertes sowie der P-, K- und Mg-Gehalte erfolgte mittels Kriging nach der Mehrpositionsvariante (GV3) sowie der Zuweisungsvariante (GV4) (Pkt 3.4.1).

Die gemessenen Nährstoffgehalte sowie die Daten der elektrischen Bodenleitfähigkeit stammten aus dem Zeitraum 1999/2002 und konnten dem Datenspeicher der Dawa entnommen werden. Für jede Teilfläche erfolgte aus diesen Daten die Berechnung der jeweiligen Mittelwerte. Der Datensatz der Nährstoffgehalte wurde in einen Analyse- und einen Verifizierungsdatensatz im Verhältnis 80:20 aufgeteilt. Dies ermöglichte die Berechnung des mittleren absoluten Fehlers (MAE).

3.4.2.2 Ergebnisse

Für die rasterförmige und die gezielte Probenahme wurde die gleiche Anzahl an Probenahmeflächen erzeugt (**Bild 30**). Die Probenahmeflächen auf der Basis der elektrischen Bodenleitfähigkeit weisen eine unregelmäßige Form und eine um den Mittelwert variierende Größe auf.

Obwohl die Nährstoffgehalte einer Region zusammengefasst wurden, weisen die Nährstoffgehalte mit Ausnahme des pH-Wertes die für Einzelschläge typischen eingipfligen Verteilungen auf (**Bild 31**). Auch die mittleren Nährstoffgehalte liegen in den für die Da-

wa typischen Bereichen. Die Daten der elektrischen Bodenleitfähigkeit sind in etwa normal verteilt. Die Spannweite reicht von reichlich 10 bis zu knapp 70 mS/m.

Stellvertretend für die räumliche Verteilung der Nährstoffgehalte der Schlaggruppe 2 wurden die gemessenen Phosphorgehalte zusammen mit dem Muster der elektrischen Leitfähigkeit dargestellt (**Bild 32**). Die Phosphorgehalte variieren wie üblich innerhalb eines Schlages. An den Schlaggrenzen weisen sie eher selten krasse Wechsel auf. Dies könnte auf Einflussfaktoren hinweisen, die schlagübergreifend auftreten. Andererseits ist rein visuell nur partiell ein Zusammenhang zwischen den Phosphorgehalten und der elektrischen Bodenleitfähigkeit erkennbar.

Durch die Interpolation mittels der Mehrpositionsvariante GV3 wird die Schätzung genauer als bei einer einfachen Zuweisung der Nährstoffgehalte zu den Probenahmeflächen (GV4) (**Bild 33**). Ein Unterschied zwischen der rasterförmigen und der gezielten Probenahme tritt nicht auf. Beide Probenahmeverfahren sind gleichwertig.

3.4.3 Beziehung zwischen den Nährstoffgehalten und der elektrischen Bodenleitfähigkeit

Die Wahrscheinlichkeit, dass die gezielte Probenahme (auf der Grundlage von Klassenflächen) einer rasterförmigen überlegen ist, ist desto höher, je enger der Zusammenhang zwischen dem Attribut, auf das sich die Klassenfläche bezieht, und dem betreffenden Nährstoffgehalt ist. Auf dem Schlag Siegreimbreite ist der Zusammenhang zwischen der elektrischen Bodenleitfähigkeit und dem pH-Wert und dem Magnesiumgehalt enger als zwischen der Bodenleitfähigkeit und dem Kalium- und Phosphorgehalt (**Bild 34**). Der Zusammenhang ist aber auch für den Kalium- und Phosphorgehalt noch eng genug, um geringere Fehler der Interpolation auf der Basis der Klassenflächenprobenahme zu erzielen.

Um die Chancen einer gezielten Probenahme im Betrieb Dawa auf der Grundlage der elektrischen Bodenleitfähigkeit abschätzen zu können, wurden für alle größeren Schläge die Korrelationskoeffizienten zwischen der elektrischen Bodenleitfähigkeit und den Nährstoffgehalten berechnet (**Bild 35**).

Auch für eine begrenzte Region, wie den Betrieb Dawa, existieren keine einheitlichen Beziehungen zwischen der elektrischen Bodenleitfähigkeit und den Nährstoffgehalten. Stellt man die entsprechenden Korrelationskoeffizienten in Form einer Häufigkeitsverteilung dar, gibt es eine mittlere, am meisten besetzte Klasse. Der entsprechende Korrelationskoeffizient ist für alle Nährstoffgehalte positiv, nimmt aber vom pH-Wert mit maximal 0,26 über den Phosphor- und Magnesiumgehalt bis zum Kaliumgehalt mit maximal 0,09 ab. Somit kann am ehesten erwartet werden, dass die elektrische Bodenleitfähigkeit für die Vorhersage des pH-Wertes und des Phosphorgehaltes geeignet ist. Die Korrelationskoeffizienten einzelner Schläge können aber innerhalb eines weiten Bereiches zwischen negativen Werten $\leq 0,5$ und positiven Werten $> 0,6$ (Kalium $> 0,4$) variieren.

3.4.4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die gezielte Probenahme auf der Grundlage der mit dem Instrument EM38 im vertikalen Dipolmodus ermittelten elektrischen Bodenleitfähigkeit ist einer reinen Rasterbeprobung teilweise, aber nicht generell, überlegen.

Ursache für die variierenden Ergebnisse der gezielten Bodenprobenahme auf der Grundlage von Klassenflächen der elektrischen Bodenleitfähigkeit sind die von Schlag zu Schlag sich ändernden Beziehungen zwischen den Nährstoffgehalten und der elektrischen Bodenleitfähigkeit. Die Korrelationskoeffizienten reichen von Werten $\geq 0,5$, über im Mittel Werten um 0,2 bis zu Werten von $\leq -0,5$. Dieser große Streubereich ist auch auf die Unterschiede in der betrachteten Tiefe zwischen den Nährstoffgehalten und der elektrischen Bodenleitfähigkeit zurückzuführen. Der Nährstoffgehalt wird für den Krumenbereich bestimmt, wohingegen das EM38 im vertikalen Dipolmodus mittlere Werte der elektrischen Bodenleitfähigkeit aus der Bodenschicht bis 1,5 m Tiefe liefert. Somit spiegelt die Leitfähigkeit auch Schwankungen des Tongehaltes in der Tiefe wider, die den Krumenbereich nicht betreffen.

Eine Probenahme auf der Basis von Klassenflächen der elektrischen Bodenleitfähigkeit (gezielte Probenahme) ist gleich oder besser als eine Probenahme auf der Basis von Rasterflächen, wenn jeweils die gleiche Größe der Probenahmefläche zugrunde gelegt wird. Die manchmal geringe Überlegenheit der gezielten Probenahme sowie die unbekannte Beziehung zwischen den Nährstoffgehalten und der elektrischen Bodenleitfähigkeit auf dem zu beprobenden Schlag erlaubt keine Vergrößerung der Probenahmeflächen im Vergleich zur Rasterbeprobung. Entscheidend für die Güte der Interpolation ist grundsätzlich die Größe der Probenahmefläche und nicht die Art ihrer Ausgrenzung.

3.5 Interpolation mit Kovariablen

3.5.1 Methoden

Neben der Nutzung zusätzlicher Merkmale zur Ausgrenzung von Klassenflächen besteht auch die Möglichkeit, zusätzliche räumliche Merkmale (Kovariablen) direkt in die Schätzung zu integrieren, um deren Güte zu erhöhen. Untersucht wurde, ob eine Verbesserung der Schätzgenauigkeit des Phosphorgehaltes im Zusammenhang mit Kovariablen durch Kriging with external drift (KED) relativ zum Kriging ohne Kovariablen (OK) erreicht werden kann.

Als Kovariablen dienten die scheinbare elektrische Bodenleitfähigkeit, Ertragsdaten sowie pH-Werte. Die Untersuchungen erfolgten auf dem Schlag Siegrennbreite. Zugrunde gelegt wurden die Phosphorgehalte sowie die pH-Werte der punktbezogenen Probenahme im 100 m- und 50 m-Raster (Pkt. 3.2). Durch das Zusammenlegen beider Raster konnte zusätzlich ein 35 m-Raster erzeugt werden (**Bild 36**). Die Daten der elektrischen Bodenleitfähigkeit wurden übernommen (Pkt. 3.4.1). Mittlere standardisierte Ertragsdaten wurden aus den Daten einer sechsjährigen Ertragserfassung bestimmt. Die Daten wurden teilweise als Rohdaten der Ertragserfassung, teilweise in einer vorab aufbereite-

ten Form aus dem Datenbestand der Dawa übernommen und mittels eines eigenen Programms aufbereitet.

Sofern die Häufigkeitsverteilungen des Phosphorgehaltes bzw. der Kovariablen von einer Normalverteilung abweichen, wurden die Daten transformiert, d.h. im konkreten Fall logarithmiert. Der Fehler der Interpolation wurde durch Kreuzvalidierung bestimmt. Bei dieser erhält man durch schrittweises Entfernen eines Beobachtungspunktes aus der Menge der Messwerte und Interpolation auf diesen Punkt eine Menge von Wertepaaren (die interpolierten und gemessenen Werte), aus denen der Fehler berechnet wird (WEBSTER & OLIVER 2001). Ausgewiesen wurde der Fehler in Form der Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler (RMSE).

3.5.2 Ergebnisse

Die gewählten Kovariablen sind mit dem Phosphorgehalt unterschiedlich korreliert (**Tab. 5**).

Tabelle 5: Spearman-Korrelationen zwischen Phosphor und den gewählten Hilfsgrößen

	Ertrag	Bodenleitfähigkeit	pH-Wert
Korrelation	0,15	0,3	0,55
Signifikanzniveau	0,07	< 0.01	< 0.001

Signifikante Zusammenhänge bestehen zu den pH-Werten und der elektrischen Bodenleitfähigkeit. Zu den über sechs Jahre gemittelten Erträgen kann dagegen kein signifikanter Zusammenhang festgestellt werden.

Aus den standardisierten Semivariogrammen geht hervor, dass die Semivarianzkurve des Phosphorgehaltes mit der des pH-Wertes gut übereinstimmt, die Semivarianzkurven der Erträge und der logarithmierten elektrischen Bodenleitfähigkeit $\log(\text{ECa})$ unterscheiden sich dagegen aufgrund der stärker ausgeprägten räumlichen Struktur von ihr (**Bild 37**). Das deutet darauf hin, dass vorzugsweise die Einbeziehung des pH-Wertes in die Interpolation deren Güte erhöhen könnte.

Um den erklärbaren Einfluss der Kovariablen auf die räumliche Struktur der Phosphorgehalte festzustellen, wurden lineare Regressionsmodelle gerechnet und deren Restanteile (Residuen) ε_P als Semivariogramme dargestellt (**Bild 38**). Je stärker die räumliche Struktur der Semivarianzkurven reduziert wird, desto effektiver war die Einbeziehung der betreffenden Kovariablen in die Interpolation.

Es zeigt sich, dass die Semivarianzkurve der Residuen des Ertragsmodells fast unbeeinflusst den gleichen Verlauf hat wie die Semivarianzkurve der Ausgangsdaten des Phosphorgehaltes. Einen wesentlich veränderten Verlauf dagegen zeigen die Semivarianzen der $\log(\text{ECa})$ - und der pH-Wert-Modelle. Hier liegen die Semivarianzwerte der Residuen niedriger als bei den Ausgangsdaten des Phosphorgehaltes, wobei die Semi-

varianzwerte für das pH-Wert-Modell deutlich stärker vermindert sind. Zusätzlich kann ein alle Kovariablen umfassendes Modell noch leicht den Verlauf vermindern. Daraus ist ersichtlich, dass der pH-Wert als Einzelvariable und ein alle Kovariablen enthaltenes Regressionsmodell am stärksten die räumliche Korrelation des Phosphorgehaltes erklärt.

Dieses Ergebnis spiegelt sich auch in den Fehlern der Interpolation wider (**Bild 39**). Die Fehler (RMSE) der Kreuzvalidierung, die sich bei der räumlichen Modellierung mit bzw. ohne Kovariablen ergeben, sind für die Datensätze mit den Probenabständen 35, 50 und 100 m dargestellt.

Die Einbeziehung von Kovariablen liefert die besseren Ergebnisse, wenn die pH-Werte bzw. alle Kovariablen umfassenden Regressionsmodelle genutzt wird. Die Einbeziehung nur der Ertrags- oder log(ECa)-Daten kann dagegen die Qualität des räumlichen Modells ohne Kovariable nicht verbessern. Es zeigt sich, dass der schwache Zusammenhang zwischen der elektrischen Bodenleitfähigkeit und dem Phosphorgehalt noch unzureichend ist, um eine Verbesserung zu erreichen.

Die relative Modellverbesserung durch die Kovariablen ist bei 35 m- und 50 m-Rasterabstand vergleichsweise gering. Für den 100 m Datensatz ist sie dagegen deutlich ausgeprägt. Es ist offensichtlich, dass bei Bodenprobenabständen um 50 m die bessere räumliche Auflösung der Phosphorgehalte die Modellqualität bestimmt und Kovariable unnötig sind. Dagegen nehmen bei schlechterer räumlicher Auflösung (100 m) methodische Aspekte und in die Modelle integrierte Kovariablen zunehmend an Bedeutung zu.

Die Einbeziehung von Kovariablen modifiziert das Bild der Verteilung des Phosphorgehaltes (**Bild 40**). Der visuelle Vergleich zeigt für das Modell ohne Kovariable eine Oberfläche mit langen gerade geschwungenen Grenzverläufen, während im Modell mit Kovariablen (**Bild 40**, rechts) die Grenzen kantiger verlaufen und neue Bereiche hoher bzw. niedriger P Werte sichtbar werden.

3.5.3 Diskussion und Schlussfolgerungen

Durch die Einbeziehung von Kovariablen in die Interpolation der Nährstoffgehalte kann die Schätzung verbessert werden. Vorausgesetzt wird allerdings eine möglichst enge Beziehung zwischen der Kovariablen und dem Nährstoffgehalt. Dies konnte am Beispiel des Phosphorgehaltes auf einem Schlag bestätigt werden. Auf diesem Schlag wurden gute Ergebnisse mit der Kovariablen pH-Wert erreicht, während die als Kovariable

häufig vorgeschlagenen Merkmale elektrische Bodenleitfähigkeit und Ertrag die Interpolation nicht verbesserten.

Bezugnehmend auf veröffentlichte und eigene Untersuchungsergebnisse scheint es, dass bisher kein zusätzliches Merkmal identifiziert werden konnte, das die Ermittlung der Verteilung der Nährstoffgehalte generell unterstützt. Ehe deshalb zusätzliche

Aufwendungen getätigt werden, um ein zusätzliches Merkmal zu erfassen, sollte vielmehr unmittelbar die Probenahmedichte zur Erfassung der Nährstoffgehalte erhöht werden.

4 Simulation

4.1 Problemstellung

Die Effizienz heutiger Computersysteme bietet die Möglichkeit, große Flächen mit definierten räumlichen Abhängigkeitsstrukturen durch geostatistische Simulationen zu erzeugen. Die geostatistische Simulation bildet dabei den räumlichen Zusammenhang und damit die räumliche Struktur einer Variablen so ab, wie sie durch ein Semivariogramm dargestellt wird. Dies bietet die Möglichkeit, für einen Standort, der durch ein Semivariogramm beschrieben ist, bestimmte Probleme exakter als durch experimentelle Untersuchungen zu klären.

In einem Beispiel wurde mittels geostatistischer Simulation der Einfluss unterschiedlicher Mischproben auf das Ergebnis der räumlichen Modellierung des Phosphorgehaltes getestet mit dem Ziel, die Bedingungen für eine optimale Probenahme zu erkunden.

4.2 Methoden

Angelehnt an die räumliche Struktur von Phosphor im Untersuchungsgebiet wurden fünfhundert 1000 x 1000 m große räumliche Zufallsfelder mit einer räumlichen Auflösung von 0,01 m simuliert. Alle Felder wurden in gleichmäßige 1 ha-Probenahmeflächen aufgeteilt und aus jeder entlang einer Kreislinie Mischproben virtuell gezogen. Der Radius der Beganglinie variierte zwischen 5, 10, ..., 45 m und die Anzahl der Einstiche zwischen 2, 4, ..., 16. Mittels der virtuellen Mischproben wurde bei jedem Simulationsvorgang ein räumliches Modell mittels Kriging Interpolation gebildet. Über eine gleichmäßig verteilte Stichprobe von 1000 Werten zwischen simulierten Feldern und interpolierten räumlichen Modellen erfolgte das Berechnen der Fehler (RMSE).

4.3 Ergebnisse

Das Ergebnis der Simulation wurde in einer Grafik zusammengefasst, das den klassierten Fehler in Abhängigkeit vom Radius der Beganglinie und der Anzahl der Einstiche zeigt (**Bild 41**). Der geringste Fehler stellt sich ein, wenn der Radius der Beganglinie zwischen 20 und 30 m und mindestens 6 Einstiche je Mischprobe gewählt wurden.

Mischproben von Beganglinien mit zu kleinem Radius erklären nur unzureichend die Variabilität der gesamten Rasterzelle, wodurch die Schätzqualität absinkt. Mischproben von Beganglinien mit zu großem Radius bewirken einen noch größeren Anstieg des Schätzfehlers. Der Abstand zwischen den Beganglinien benachbarter Probenahmeflächen nimmt ab. Der Boden von Einstichen, die dicht beieinander liegen, wird unter-

schiedlichen Mischproben zugeordnet, wodurch keine neuen Informationen in das räumliche Modell einfließen können.

Um eine optimale Schätzqualität zu erreichen, ist es ferner notwendig, mindestens sechs bis acht Einstiche zu ziehen. Eine Mischprobe dieser Größe reicht aus, um die störende kleinräumige Variabilität des Phosphorgehaltes hinreichend zu unterdrücken.

4.4 Schlussfolgerungen und Diskussion

Die geostatistische Simulation ist eine Möglichkeit, um mit begrenztem Aufwand Fragestellungen am Rechner umfassend beantworten zu können. Die Untersuchung erfordert jedoch die Festlegung auf definierte Standortbedingungen, deren Charakterisierung vorab experimentell erfolgen muss(te). Damit ist die Verallgemeinerung des Ergebnisses eingeschränkt.

Denkbar sind Simulationen für eine Vielzahl von Standortbedingungen, deren Ergebnisse standortabhängig abgespeichert werden könnten. Auf diese Ergebnisse kann zurückgegriffen werden, sobald die eigenen Standort-/Schlagbedingungen erkundet worden sind.

5 Alternativen zur konventionellen Nährstoffkartierung

5.1 Problemstellung

Da auch für die Zukunft nur wenig Aussicht besteht, die Kosten der Probenahme für eine genaue Nährstoffkartierung signifikant senken zu können, wird nach Alternativen gesucht, um die konventionelle Probenahme abzulösen. Alternative Lösungswege werden in der Entwicklung neuer Auswerteverfahren von Daten der Fernerkundung sowie in der Entwicklung von Bodensensoren gesehen. Bodensensoren sollen den Nährstoffzustand unmittelbar vor Ort erfassen, so dass ein Transport von Boden zu einem Labor entfällt. Dazu sind die Bodensensoren auf einer Einrichtung bodennah oder in einer bestimmten Höhe zu installieren, wobei ihnen im letzteren Fall der Boden periodisch zur Analyse zugeführt werden muss. Die Einrichtung bewegt sich kontinuierlich auf dem zu untersuchenden Schlag vorwärts. Diese Art der Messungen wird im englischen Sprachraum „on-the-go“ genannt.

Zum Einsatz kommen sowohl elektrochemische als auch optische Sensoren. Die elektrochemischen Sensoren beruhen auf dem Einsatz von ionenselektiven (ionensensitiven) Membranen, d.h. auf Membranen, die nur die Ionen des gesuchten Nährstoffs passieren lassen. Generell unterscheidet man zwischen ionenselektiven Elektroden (ISE) und ionensensitiven Feldeffekttransistoren (ISFET).

Marktvorgängig ist bereits ein automatisches System zur Kartierung des pH-Wertes sowie der elektrischen Bodenleitfähigkeit (LUND *et al.* 2005, ADAMCHUK *et al.* 2007). Es basiert auf Untersuchungen, über die erstmals vor etwa 10 Jahren berichtet wurde. Das

System wird von einem Fahrzeug gezogen und besteht aus einer rechnergesteuerten Einheit zur Bodenaufnahme, einem globalen Positionierungssystem und einer pH-Messeinrichtung, bestehend aus einer ionenselektiven Elektrode mit flacher Oberfläche. Das System misst den pH-Wert an dem natürlich feuchten Boden. Eine lineare Regressionsfunktion wurde verwendet, um die Ausgangsspannung der Elektrode mittels im Labor ermittelter pH-Werte zu kalibrieren (ADAMCHUK *et al.* 1998, ADAMCHUK *et al.* 1999). Das System ist in der Lage, den pH-Wert alle 10 s zu bestimmen (ADAMCHUK *et al.* 2006). In einigen Fällen ist es erforderlich, die pH-Werte zusätzlich schlagabhängig zu kalibrieren, um einen Versatz der Werte auszugleichen. Nach der Kalibrierung war der mittlere Fehler der on-the-go-Messungen des pH-Wertes kleiner 0,3, wohingegen der Fehler bei konventioneller Rasterprobenahme größer 0,4 war (ADAMCHUK *et al.* 2007).

Zwecks Erweiterung des Einsatzbereiches der Einrichtung wurde das Potential für die Nutzung der ionenselektiven Elektroden für die gleichzeitige Messung des pH-Wertes, des Kaliums, des Nitrat-Stickstoffs und des Natriumgehaltes am natürlich feuchten Boden analysiert. Die anfänglichen Resultate waren noch nicht befriedigend (ADAMCHUK *et al.* 2005). Deshalb wurde für die gemeinsame Kartierung des pH-Wertes, des Kaliums und des Reststickstoffs bei Verwendung von ionenselektiven Elektroden die direkte Analyse des feuchten Bodens ersetzt durch die Analyse einer Boden-Wasser-Lösung. Um diese zu homogenisieren, wurde eine spezielle Rührkammer entwickelt, in der die Elektroden installiert sind (SETHURAMASAMYRAJA *et al.* 2007, SETHURAMASAMYRAJA *et al.* 2008).

Der Einsatz ionenselektiver Elektroden für die Erfassung des Kaliumgehaltes wird als hinreichend präzise und genau für den routinemäßigen Einsatz angesehen, wenn die Störgrößen Umgebungstemperatur und die Bodenfeuchte parallel aufgenommen und zur Korrektur des Ausgangssignal der Elektroden genutzt werden (BROUDER *et al.* 2003).

Ein Messsystem auf der Grundlage eines ionensensitiven Feldeffekttransistors zur on-the-go Messung des pH-Wertes sowie zur Bestimmung des Kalkbedarfes wird in einem Gemeinschaftsprojekt zwischen dem Australian Centre for Precision Agriculture (AC-PA), the Swedish Institute for Agricultural and Environmental Engineering (JTI) and Computronics Holdings Ltd. entwickelt. Das System besteht aus einer Bodenaufnahme- und Siebeinrichtung, einer pH ISFET-Analytikeinheit sowie einem Rechner zur Datenspeicherung mit Software. Es wurde eingeschätzt, dass noch einige Verbesserungen des Systems erforderlich sind (VISCARRA ROSSEL *et al.* 2004, VISCARRA ROSSEL *et al.* 2005).

Auch an anderer Stelle wird an der Entwicklung ionensensitiver Feldeffekttransistoren gearbeitet. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf der Entwicklung spezieller ionensensitiver Membranen und spezieller Lösungen für die gleichzeitige Erfassung von Nitrat und Kalium (KIM *et al.* 2004).

Während elektrochemischen Sensoren der Boden zugeführt werden muss, ist es möglich, spektraloptische Sensoren (Spektrophotometer) direkt an einem Werkzeug anzubringen, das durch den Boden gezogen wird. Um den Kalkbedarf zu schätzen, wurden mit einem optischen Sensor erfasste Daten im nahen Infrarotbereich (NIR) und gleichzeitig aufgenommene Daten des pH-Wertes sowie der elektrischen Bodenleitfähigkeit mittels intelligenter Software kombiniert (CHRISTY 2004).

Mit dem Ziel, einen on-the-go-Bodensensor für die Erfassung des pH-Wertes sowie der Nährstoffgehalte zu entwickeln, erfolgte die Untersuchung des Bodenspektrums in dem weiten Wellenlängenbereich von 400 – 2498 nm, d.h. im Wellenbereich des sichtbaren Lichts (VIS) sowie des nahen Infrarots (NIR). Die Bestimmtheitskoeffizienten der Vorhersagemodelle variierten zwischen 0,24 und 0,88 (LEE *et al.* 2003).

Ein on-the-go-Spektrometer (VISNIR-Sensor) für den Wellenlängenbereich 305 – 1711 nm wurde vor einer Pflanzmaschine mit Düngerstreuer angebracht, um die Phosphordüngung zu steuern. Ein eigenes LabView Programm wurde entwickelt, um das Bodenspektrum aufzunehmen, den Phosphorgehalt während der Messung zu bestimmen und eine Empfehlung für die Phosphordüngung für den Düngerstreuer zur Verfügung zu stellen (MALEKI *et al.* 2008). Der VISNIR-Sensor bestand aus einem Bodenlockerer, an dem ein Spektrometer so angebracht war, dass das Spektrum der Furchensohle aufgenommen werden konnte. Kalibrierungsmodelle wurden entwickelt. Die Übereinstimmung der Online-Messungen des Phosphatgehaltes mit entsprechenden Referenzmessmethoden waren vorerst noch moderat (MOUAZEN *et al.* 2006).

Optische Sensoren kommen nicht nur bodennah, sondern auch bodenfern, vorrangig aus Flugzeugen und Satelliten, zum Einsatz. Dabei lässt sich heute eine Bildauflösung von weniger als 10 m² erreichen, was einer Probenahmedichte von 1000 Probenahmen je Hektar entspräche.

Die optischen Sensoren (Spektrometer) können die Reflexion des Bodens oder der Pflanzenbestände in einem sensorabhängigen Wellenlängenbereich messen. Im Rahmen der Forschung wird ein großer Bereich, aufgelöst in enge Wellenlängenbereiche, erfasst. Im Ergebnis der Untersuchungen soll eine Größe gefunden werden, die sich aus den Reflexionswerten weniger einzelner Wellenlängenbereiche berechnen lässt und die eng mit dem gesuchten Nährstoffgehalt korreliert ist. Aus den unten zitierten Untersuchungsergebnissen, die unter unterschiedlichen Standortbedingungen und unter Anwendung verschiedenartiger mathematischer Methoden ermittelt wurden, lässt sich noch keine einheitliche Bewertung des Forschungsansatzes erkennen.

Es existiert eine strenge Abhängigkeit ($R^2 = 0,92$) zwischen dem Phosphorgehalt und der Absorption des Bodens (untersuchter Wellenlängenbereich 225 bis 2550 nm) (BOGREKCI & LEE 2005). Eine bessere Schätzung des pH-Wertes, des Kalkbedarfs und von P war möglich unter Nutzung der Strahlung des mittleren Infrarotbereiches (MIR). Das nahe Infrarot (NIR) war günstiger für die Schätzung von K (untersuchter Wellenlängenbereich 400 – 25000 nm) (VISCARRA ROSSEL *et al.* 2006). Mittels NIR und MIR konn-

te der pH-Wert, Ca, Mg und K kalibriert werden. Für P ergab sich keine sinnvolle Abhängigkeit (Wellenlängenbereich 400 – 25000 nm) (McCARTY & REEVES 2006). NIR war gut geeignet, um den pH-Wert zu schätzen ($r = 0,91$), aber nur wenig geeignet, um P und K ($r = 0,47$ bzw. $0,68$) zu schätzen (untersuchter Wellenlängenbereich NIR) (HE *et al.* 2007). Für Ca, K, Mg und P konnte eine Abhängigkeit mit einer Bestimmtheit bis zu $0,65$ ermittelt werden (untersuchter Wellenlängenbereich 250 – 2500 nm) (GE *et al.* 2007). Für Phosphor konnte eine wesentlich bessere Beziehung (R^2 etwa $0,7$) als für den pH-Wert, Ca, Mg, und K ermittelt werden (untersuchter Wellenlängenbereich 429 to 1010 nm) (DETAR *et al.* 2008). Der Korrelationskoeffizient für den pH-Wert war höher ($0,80$), als der für P und K (etwa $0,68$) (untersuchter Wellenlängenbereich 225 bis 2550 nm) (PENG *et al.* 2009).

Aufgrund der Literaturanalyse ist festzustellen, dass der alleinige Einsatz optischer Sensoren für die Bestimmung des pH-Wertes sowie der Makronährstoffe im Boden, mit Ausnahme von vielleicht Phosphor, demnächst noch nicht zu erwarten ist. Im Gegensatz zu ihnen haben elektrochemische Sensoren die Praxisreife bereits erreicht bzw. werden sie demnächst erreichen. Ihr Einsatz wurde deshalb unter den Bedingungen der Dawa simuliert.

5.2 Simulation eines on-the-go-Verfahrens

5.2.1 Methoden

Prinzipbedingt wird eine Einrichtung, der für die Bodenaufnahme nur wenig Zeit zur Verfügung steht, statt einer Mischprobe nur eine Einzelprobe entnehmen können. Die Auswirkungen dieses Aspekts eines „on-the-go“-Verfahrens auf die ermittelte Nährstoffverteilung sollte überprüft werden.

Aus den beiden Untersuchungsschlägen Siegrennbreite und Sandberg wurde jeweils eine 400×400 m-Teilfläche (16 ha) ausgegrenzt, die eine hohe Variabilität der elektrischen Bodenleitfähigkeit aufwies (**Bild 42**). Sie wurden in einem 25 m-Raster ($1/16$ ha) beprobt. Die Probenahme geschah in Form von Einzelproben, wobei mit einem schaufelförmigen Werkzeug Boden bis zu einer Tiefe von 10 cm entnommen wurde. Die Analyse der Proben hinsichtlich des pH-Wertes sowie der P-, K- und Mg-Gehalte erfolgte analog zu der Analyse von Mischproben im Labor. Die Probenahme wurde zeitgleich mit den anderen Probenahmen im Herbst 2007 durchgeführt. Die Interpolation der Daten erfolgte mittels Kriging. Die Analysewerte der Einzelprobenahme im 25 m-Raster wurde mit den Analysewerten der punktbezogenen Mischprobenahme im 50 m-Raster (Pkt. 3.2) verglichen. Zur Berechnung des mittleren absoluten Fehlers (MAE) dienten die Messwerte der punktbezogenen Mischprobenahme im 100 m-Raster (Pkt. 2.2).

5.2.2 Ergebnisse

Die beiden Teilflächen auf den Schlägen Siegrennbreite und Sandberg sind optimal bis hoch mit Nährstoffen versorgt (**Bild 43**). Die Mittelwerte der pH-Werte der Teilflächen

stimmen mit denen der Gesamtschläge (**Bild 3**) überein. Die Magnesiumgehalte sind gleich (Siegrennbreite) bzw. niedriger (Sandberg). Demgegenüber sind die Phosphor- und Kaliumgehalte der Teilflächen eindeutig höher und auch durch eine vergleichsweise größere Standardabweichung charakterisiert.

Die Muster der Verteilung des Phosphorgehaltes und mit Einschränkungen des pH-Wertes zeigen visuell eine hohe Übereinstimmung zwischen dem 50 m- und dem 25 m-Raster auf der Siegrennbreite (**Bild 44**). Diese Übereinstimmung sinkt für den Magnesiumgehalt und ist für den Kaliumgehalt nur noch bedingt vorhanden.

Die Nährstoffgehalte benachbarter Probenahmeflächen ähneln sich nicht nur bei dem 50 m-Raster, sondern auch bei dem 25 m-Raster (**Bild 44**). Trotz der Einzelprobenahme bei dem 25 m-Raster zeigen sich in den Darstellungen zusammenhängende Bereiche der einzelnen Klassen der Nährstoffgehalte. Folglich sind auch Einzelproben in der Lage, die Verteilung der Nährstoffgehalte zu charakterisieren. Die gleiche Beobachtung trifft auch für die Teilfläche des Sandberges zu (**Bild 45**). Wie bereits auf dem Gesamtschlag (**Bild 7**) führen die hohen pH-Werte zur überwiegenden Einstufung in die höchste Klasse. Unterschiede zwischen verschiedenen Ansätzen werden auf diese Weise verschleiert und lassen sich nicht mehr erkennen.

Der Einfluss der Probenahme auf die räumliche Abhängigkeit der Nährstoffgehalte und den Range zeigen die entsprechenden Semivariogramme (**Bilder 46 und 47**). Eine starke räumliche Abhängigkeit der Daten, bestimmt durch das Nugget-Sill-Verhältnis (Pkt. 3.1), weisen auf der Siegrennbreite für das 25 m-Raster der pH-Wert und der P-Gehalt, für das 50 m-Raster die P-, K- und Mg-Gehalte auf. Für die anderen Daten gilt eine moderate räumliche Abhängigkeit (**Bild 46**). Auf dem Sandberg offenbaren alle Nährstoffe eine starke räumliche Abhängigkeit (**Bild 47**). Damit werden die Voraussetzungen für eine hohe Interpolationsgüte durch beide Varianten der Probenahme erfüllt. Die größten Unterschiede der Probenahme treten auf der Siegrennbreite bei dem pH-Wert und dem K-Gehalt auf. Durch die Einzelprobenahme im 25 m-Raster lässt sich die räumliche Abhängigkeit des Kaliums deutlich schlechter als durch die Mischprobenahme im 50 m-Raster erfassen. Für den pH-Wert gilt der entgegen gesetzte Fall.

Der Range bewegt sich auf der Siegrennbreite unabhängig von dem Nährstoffgehalt und dem Probenahmeraster zwischen 120 und 150 m. Davon weicht nur der pH-Wert bei dem 25 m-Raster mit 87 m ab. Auf dem Sandberg variiert der Range abhängig von dem Nährstoffgehalt wesentlich stärker. Den maximalen Range von 196 m weist der pH-Wert aufgrund der wenig variierenden Werte auf. Der minimale Range von 83 m wird durch den stärker streuenden Kaliumgehalt verursacht.

Bei der Interpretation der Interpolationsfehler auf der Siegrennbreite ist zu berücksichtigen, dass die Verifizierungsdaten sowie die Daten des 50 m-Rasters einer punktbezogenen Mischprobenahme entstammen, wohingegen die Daten des 25 m-Rasters das Ergebnis einer Einzelprobenahme sind. Trotzdem sind mit Ausnahme des Kaliums die Fehler, die auf der Grundlage des 25 m-Rasters berechnet wurden, geringer als die

Fehler auf der Grundlage des 50 m-Rasters (**Bild 48**). Kalium weist auf der Siegrennbreite eine große kleinräumige Variabilität auf, die die Interpolation der Einzelproben erschwert. Die Mischprobenahme gleicht in diesem Fall den größeren Rasterabstand mehr als aus. Dieses von den anderen Nährstoffgehalten abweichende Verhalten von Kalium ist aber nicht typisch, sondern schlagspezifisch. Auf dem Sandberg, auf dem vergleichbar mit der Siegrennbreite etwa ähnliche Interpolationsfehler der Daten des 25 m-Rasters auftreten, weicht der Fehler für Kalium nicht wesentlich von denen der anderen Nährstoffgehalte ab.

5.3 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Auswertung von Daten der Fernerkundung zur Bestimmung des Nährstoffzustandes von Schlägen ist noch nicht praktikabel. In der näheren Zukunft werden dagegen Bodensensoren, insbesondere elektrochemische Sensoren, zum Einsatz kommen. Eine Plattform der Firma Veris®Technologies, auf die ein sogenannter pH-Manager zur on-the-go-Bestimmung des pH-Wertes aufgebaut werden kann, ist marktverfügbar (<http://www.veristech.com/products/soilph.aspx>). Der Stand der Forschung lässt erwarten, dass auch die Erfassung von Nährstoffgehalten demnächst folgen wird.

Mit dem Einsatz von Bodensensoren sind zwei Probleme verknüpft. Die Analyseverfahren werden von denen, die im Labor verwendet werden und durch Standards festgelegt sind, mehr oder weniger abweichen und anstelle von Mischproben werden Einzelproben gezogen. Im günstigsten Fall gelingt es Kalibrierfunktionen zu entwickeln, die gestatten, die „neuen“ Analysewerte im Verhältnis 1:1 in die traditionellen Werte umzurechnen. Doch wird dies eher nicht der Fall sein, so dass zusätzlich zu der technischen Entwicklung der Geräte und Analyseeinheiten angepasste Düngeempfehlungen auf der Grundlage der neuen Analysewerte erarbeitet werden müssen.

Die Entnahme von Einzelproben anstelle von Mischproben für die Analyse ist dagegen kein Hindernis für die Einführung der „on-the-go“-Nährstoffaufnahme. Die Interpolation der Daten der dichter aufgenommenen Einzelproben erwies sich in den eigenen Untersuchungen als zuverlässiger im Vergleich zur Interpolation traditionell aufgenommener Mischproben im 50 m-Raster. Die Überlegenheit der „on-the-go“-Nährstoffbestimmung nimmt noch zu, wenn der Vergleich zu einer Probenahme im 1 ha-Raster und größer durchgeführt würde.

Im Interesse einer zuverlässigen Erfassung der Nährstoffverteilung mit einem vertretbaren Aufwand ist die Entwicklung und Einführung der „on-the-go“-Nährstoffbestimmung zu unterstützen. Das schließt die Erarbeitung angepasster Düngeempfehlungen auf der Grundlage von Analysewerten, die eventuell von den gegenwärtig standardisierten abweichen werden, ein.

6 Kontrolle des Düngungsergebnisses

6.1 Problemstellung

Teilflächenspezifische Grunddüngung auf der Grundlage einer Probenahme im kleinräumigen Raster verursacht anfänglich höhere Aufwendungen. Desto wichtiger ist es für den Anwender, das Ergebnis der durchgeführten Maßnahmen möglichst umgehend kontrollieren zu können. Dieses Bedürfnis steht scheinbar im Widerspruch zur nur trägen Veränderung der Nährstoffgehalte im Boden. Deshalb wurde eine Wiederholung einer Nährstoffgrundinventur zur Kontrolle, ob durch eine teilflächendifferenzierte Düngung der Teilflächen eine Angleichung der Nährstoffgehalte erreicht wurde, erst nach 10 - 15 Jahren empfohlen (AUTORENKOLLEKTIV 2000). Diese Empfehlung berücksichtigt allerdings neben der zeitlichen Veränderung der Nährstoffgehalte auch die hohen Kosten einer Grundinventur. Das Ergebnis einer Düngung oder einer Aushagerung durch Verzicht auf die Düngung ist zudem schwierig bestimmbar, weil sich aufgrund der Streuung infolge des Messfehlers erst größere Unterschiede zwischen den Nährstoffgehalten sichern lassen. Gelingt es den Messfehler zu minimieren, müssten Veränderungen der Nährstoffgehalte schneller sichtbar werden.

Einer Verringerung des Messfehlers in den letzten Jahren ist es wahrscheinlich geschuldet, dass bereits nach einem Betrachtungszeitraum von vier bis sieben Jahren Erfolge bei der Optimierung der Nährstoffgehalte nachgewiesen werden konnten. Daraus wurde geschlussfolgert, dass sich messbare Erfolge intelligenter Düngungsstrategien möglicherweise schneller erreichen lassen als bisher vermutet (LEITHOLD & KERSCHBERGER 2007).

In eigenen Untersuchungen war unter den Bedingungen der Dawa zu klären, ab wann Veränderungen der Nährstoffgehalte erkannt werden können. Die gute zeitliche Reproduzierbarkeit der Nährstoffgehalte (Pkt. 2.3) war Anlass, Änderungen nicht erst nach Jahren, sondern bereits nach Monaten nachzuspüren. Zusätzlich waren die Bilanzen für die untersuchten Teilflächen zu kalkulieren, um den Zusammenhang zwischen einer Veränderung der Nährstoffgehalte und der durchgeführten Düngung erkennen zu können.

6.2 Kurzfristige Veränderungen

6.2.1 Methoden

Im Gliederungspunkt 3.2 waren die Veränderungen der Nährstoffgehalte über einen Zeitraum von 1,5 Jahren auf der Schlaggruppe 1 untersucht worden. Diese Datenbasis wurde genutzt, um nach Zusammenhängen zwischen der Veränderung der Nährstoffgehalte und der Nährstoffbilanz zu suchen. Aufgrund der positionsgenauen Wiederholung der quasi punktförmigen Probenahmen war ein minimaler Probenahmefehler erzielt worden.

Die Veränderung der Nährstoffgehalte wurde aus den Phosphor-, Kalium- und Magnesiumgehalten der Schlaggruppe 1 zu den 2 Probenahmezeitpunkten Frühjahr 2007 (PZ1) und Herbst 2008 (PZ4) berechnet (**Bild 12**). Die beiden 38 ha großen Schläge waren im Gegensatz zu den anderen Schlägen im Sommer 2008 teilflächenspezifisch gedüngt worden. Die Proben waren als punktbezogene Mischproben im 100 m-Raster gezogen worden.

Die Bilanzierung wurde für jede 1 ha-Probenahme- bzw. Teilfläche durchgeführt. Die Berechnung erfolgte für Kreisflächen mit einem Durchmesser von 25 m um den Mittelpunkt der Probenahme. Die Erträge und die ausgebrachten Düngermengen wurden aus dem Speicher der Dawa übernommen. Aus den Erträgen und Düngermengen erfolgte die Berechnung des Nährstoffaustrages bzw. -eintrages. Die Nährstoffbilanzen wurden für jedes Jahr einzeln und als jährliches Mittel des untersuchten Zeitraums berechnet.

Die durch die Dawa aufgenommenen Ertragsdaten wurden sowohl visuell als auch durch die Anwendung eines eigenen Programms aufbereitet, von Fehlwerten befreit, kalibriert und auf Einheitsfeuchten umgerechnet. „As applied“-Daten der Düngung standen nicht zur Verfügung, so dass die Aussagen der Sollwertkarten als wahr unterstellt werden mussten.

6.2.2 Ergebnisse

Der Vergleich der Phosphorgehalte der gesamten Schlaggruppe 1 zwischen dem Frühjahr 2007 und dem Herbst 2008 lässt eine relativ gleichmäßige Streuung um die 45 °-Linie, die Linie gleicher Nährstoffgehalte, erkennen (**Bild 49**, links oben). Betrachtet man dagegen nur die gedüngten Schläge dieser Schlaggruppe, sieht man, dass vorrangig anfänglich niedrige P-Gehalte von <10 mg/100g Boden erhöht werden konnten (**Bild 49**, rechts oben). Der Effekt der teilflächenspezifischen Phosphordüngung deutet sich bereits an.

Insgesamt ist die Phosphorbilanz der Schlaggruppe 1 jedoch, ob gedüngt oder ungedüngt, für alle Teilflächen negativ (**Bild 49**, unten). Die Beziehung zwischen der Phosphorbilanz und der Veränderung der Phosphorgehalte stellt sich als gestreckte Punktwolke dar. Die Regressionsgerade hat ein geringes Bestimmtheitsmaß, das aber relativ zunimmt, wenn nur die gedüngten Schläge betrachtet werden. Tendenziell ist jedoch der plausible Zusammenhang erkennbar. Mit steigender Phosphorbilanz nimmt die negative Veränderung der Phosphorgehalte ab bzw. die positive Veränderung zu.

Eine Abnahme der Phosphorgehalte ist erst zu beobachten, wenn die Phosphorbilanz geringer als etwa -30 bis -20 kg/ha*Jahr ist. Das bedeutet, dass während des kurzen betrachteten Zeitraums auch bei leicht negativen Bilanzen ein vorhandener Zustand erhalten werden konnte.

Insgesamt ähnliche Tendenzen wurden auch für Kalium und Magnesium ermittelt (**Bild 50**). Kalium kann als Beispiel für eine ideal ausgeführte teilflächenspezifische

Grunddüngung dienen (**Bild 50**, obere Bildreihe). Die minimalen Kaliumgehalte auf den gedüngten Schlägen wurden auf einen Wert von 13 mg/100 g angehoben. Die anfänglich hohen Kaliumgehalte nehmen ab. Langfristig wäre eine einheitliche Kaliumversorgung auf einem mittleren Niveau erreichbar. Die Beziehung zwischen der Gehaltsänderung und der Bilanz sind für Kalium enger als für Phosphor (**Bild 50**, zweite Bildreihe von oben).

Die Magnesiumgehalte wurden auf den gedüngten Schlägen teilweise noch angehoben, wo auf eine Düngung hätte bereits verzichtet werden können.

6.3 Mittelfristige Veränderungen

6.3.1 Methoden

Eine erneute Probenahme auf Ackerflächen soll spätestens nach 6 Jahren erfolgen (VON WULFFEN *et al.* 2007). Zumindest dieser Zeitraum müsste hinreichend sein, um Veränderungen der Nährstoffgehalte als Resultat durchgeführter oder unterlassener Düngung erkennen zu können.

Für die Untersuchung wurden Schläge der Dawa ausgewählt, auf denen im Jahr 2001 die Bodenprobenahme entlang Beganglinien in Form relativ kleiner Kreise erfolgt war. Im Frühjahr 2007 erfolgte eine erneute Probenahme entlang kreisförmiger Beganglinien mit einem Durchmesser von 10 m um die angegebenen Mittelpunkte der Probenahme 2001. Aus den Mischproben wurden die Phosphor-, Kalium- und Magnesiumgehalte des Jahres 2007 bestimmt. Die beprobten 8 Schläge summierten sich zu einer Gesamtfläche von 200 ha, wobei die Schlaggrößen zwischen 11 und 58 ha variierten. Sie wurden zur Schlaggruppe 3 zusammengefasst.

Im Ergebnis der Kalkulation wurden analog zu Pkt. 6.2 die durchschnittlichen jährlichen Bilanzen des 6-jährigen Bilanzzeitraums ermittelt. Die Nährstoffgehalte 2001 und die Angaben zur durchgeführten Düngung konnten dem Speicher der Dawa entnommen werden. Das gleiche gilt für die Ertragsdaten. In den Jahren, in denen keine Mähdruschfrüchte angebaut worden waren oder aus anderen Gründen keine teilflächenspezifischen Ertragsdaten vorhanden waren, wurden schlageinheitliche Erträge unterstellt.

6.3.2 Ergebnisse

Wie häufig auf Schlägen der Dawa sind auch auf der Schlaggruppe 3 hohe pH-Werte zu verzeichnen (**Bild 51**). Die Phosphor-, Kalium- und Magnesiumgehalte sind als normal bis hoch einzuschätzen. Die Standardabweichungen sind relativ hoch, was für eine Schlaggruppe nicht untypisch ist.

Auf der Schlaggruppe 3 wurden im Jahr 2001 Teilflächen mit Phosphorgehalten <5mg/100 g detektiert (**Bild 52**, obere Reihe). Die Ausbringung des Phosphordüngers erfolgte gezielt in diesen Bereichen, was in durchschnittlichen Phosphorbilanzen zwischen +15 und -30 kg/ha*Jahr resultierte. Das entspricht im Wesentlichen einer Phos-

phordüngung nach Entzug. In den Bereichen mit höheren Phosphorgehalten erfolgte nur eine schwache bzw. keine Düngung. Die Phosphorbilanzen sind generell negativ.

Durch diese Düngungsstrategie werden einige Teilflächen, deren Phosphorgehalte 2001 unterhalb 10 mg/100 g lagen, aufgedüngt (**Bild 52**, oben rechts). Zugleich kann nicht vermieden werden, dass nicht nur ehemals hohe Phosphorgehalte weiter absinken. Somit existieren auch 2007 weiterhin Teilflächen mit Phosphorgehalten <5mg/100g.

Die Beziehung zwischen der Phosphorbilanz und der Veränderung der Phosphorgehalte ist ähnlich schwach wie in dem kurzen Zeitraum (**Bild 52**, unten). Eine Abnahme der Nährstoffgehalte für den sechsjährigen Zeitraum kann nur durch eine ausgeglichene Bilanz vermieden werden.

Bei Kalium und Magnesium ist die Düngestrategie anhand der Grafiken schwieriger zu erkennen (**Bild 53**). Die durchgeführte Düngung, die zu den noch relativ hohen Kaliumbilanzen zwischen 0 und -100 kg/ha*Jahr führte, diente im Wesentlichen dazu, Kaliumgehalte im Bereich zwischen 10 – 20 mg/100 g nicht absinken zu lassen (**Bild 53**, oben links). Das gelang aber nur auf einem Teil der Schlaggruppe 3. In anderen Bereichen wurde auf die Düngung verzichtet, so dass auch Kaliumgehalte in dieser Größenordnung im Untersuchungszeitraum noch zurückgingen (**Bild 53**, Mitte links).

Obwohl Kalium, wie schon bei dem kurzfristigen Vergleich, die relativ engste Beziehung zwischen der Gehaltsänderung und der dazu erforderlichen Bilanz aufweist, ist diese doch absolut gesehen nur schwach ausgeprägt (**Bild 53**, unten). Die ausgewiesene geringfügig negative Bilanz, die ein Absinken der Kaliumgehalte verhindert, ist aufgrund der großen Streuung der Einzelwerte unsicher. Folglich ist auch analog zu Phosphor davon auszugehen, dass für den Erhalt des Kaliumniveaus eine ausgeglichene Bilanz erforderlich ist.

Magnesium scheint im Wesentlichen in Anlehnung an den Entzug gedüngt worden zu sein (**Bild 53**, rechts). Die Bilanzen sind relativ einheitlich und variieren um einen mittleren Wert von -10 kg/ha*Jahr. Nur auf zwei Schlägen der Schlaggruppe 3 hat eine erhebliche Düngung stattgefunden, die eine hohe Magnesiumbilanz bewirkte. Diese Düngung erfolgte aber nicht in den Bereichen mit den niedrigsten Magnesiumgehalten. Im Wesentlichen wurde der Magnesiumversorgungszustand im Untersuchungszeitraum aufrecht erhalten.

6.4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Bodenprobenahme und Analyse sind grundsätzlich hinreichend genau, um Veränderungen des Nährstoffzustandes eines Schläges erkennen zu können. Der Normalfehler der Probenahme und Analyse bei Wiederholungsbeprobungen steigt jedoch in dem Maße, wie die Einstichpositionen voneinander abweichen. Gelingt es den Normalfehler zu minimieren, lassen sich selbst kurzfristige Veränderungen erfassen. Wird von diesen optimalen Voraussetzungen abgewichen, wird es schwieriger, zwischen der Streuung

der Werte infolge des Normalfehlers und der wahren Veränderung der Nährstoffgehalte zu unterscheiden.

Generell stehen der Normalfehler, die Veränderung des Nährstoffgehaltes, die durch den betrachteten Zeitraum beeinflusst wird, und die Anzahl der zu untersuchenden Probenahmeflächen in einem Verhältnis zueinander. Bei einem kleinen Normalfehler und einer großen mittleren Veränderung des Nährstoffgehaltes reicht bereits die Beprobung weniger Probenahmeflächen aus, um die Veränderung sicher erfassen zu können. Das entspräche der Anwendung des Testparzellenverfahrens (Pkt. 1). Bei einem größeren Normalfehler kann eine im Mittel kleinere Veränderung der Nährstoffgehalte dagegen nur durch die Beprobung einer größeren Anzahl von Probenahmeflächen abgesichert werden.

Im Gegensatz zur Veränderung der Nährstoffgehalte lässt sich die Bilanz kleiner Teilflächen unter Praxisbedingungen nur schwierig bestimmen. Die Beziehung zwischen der Bilanz und der Veränderung der Nährstoffgehalte ist unsicher. Der Fehler der Ertragserfassung sowie der Fehler der Erfassung der ausgebrachten Düngermenge fällt bei der Betrachtung relativ kleiner Teilflächen offensichtlich stärker ins Gewicht. Zudem wäre zu hinterfragen, ob die in Tabellen abgelegten mittleren Nährstoffgehalte des Erntegutes auch für eine konkrete Teilfläche hinreichend präzise sind. Nicht betrachtet wird bei der Bilanzierung auch die Nährstoffversorgung der Pflanzen aus dem Unterboden.

Trotz der großen Variabilität der Bilanzwerte spiegelt die Trendkurve der Beziehung zwischen dem Nährstoffgehalt und der Nährstoffbilanz eine mittlere standorttypische Beziehung wider. Obwohl diese statistisch nicht gesichert ist, so grenzt sie doch die in der Literatur genannten großen Spannweiten dieser Beziehung auf die eigenen Standortbedingungen ein.

Realistischerweise muss allerdings eingeschätzt werden, dass der Aufwand zur Kalkulation realer teilflächenspezifischen Bilanzen im Vergleich zum erreichten Ergebnis hoch ist. Der Aufwand erstreckt sich auf die jährliche Ertragserfassung und die unbedingt erforderliche Bearbeitung der Ertragskarten, die Erfassung der Düngung in Form „as applied“-Karten und die eigentliche Kalkulation der Bilanzen. Bei Vorliegen der Daten lässt sich der letzte Arbeitsschritt programmieren, so dass der wirkliche Aufwand in der Datenerfassung liegt. Der Gesamtaufwand wird sich nur in Ausnahmefällen von einem landwirtschaftlichen Betrieb bewältigen lassen. Somit wird sich die Kontrolle des Düngungsergebnisses auf die Erfassung der Veränderung der Nährstoffgehalte beschränken.

7 Teilflächenspezifische Phosphorbilanzen

7.1 Problemstellung

Betriebliche Nährstoffbilanzen sind für Phosphor und Stickstoff gesetzlich vorgeschrieben (ANONYM 2007). Indem die Einhaltung zulässiger Bilanzbereiche kontrolliert wird,

soll eine Überdüngung ausgeschlossen werden. Diese Forderung ist im Mittel eines Betriebes zu erfüllen. Sie lässt eine größere Variabilität der Bilanzen zwischen den einzelnen Schlägen und erst recht zwischen Teilflächen der Schläge zu. Die Variabilität zwischen den Schlägen kann der Landwirt durch Anwendung der Schlagbilanzierung ermitteln und sie im Weiteren einschränken. Dadurch senkt er seine Aufwendungen und die Beeinflussung der Umwelt.

Anwender der teilflächenspezifischen Grunddüngung unterstellen, dass durch teilflächenspezifisch angepasste Bilanzen die Variabilität der Nährstoffgehalte innerhalb des Schlages verringert wird. Zugleich soll durch Anpassung der Düngung an die durchschnittlichen Nährstoffgehalte der Teilflächen die erforderliche Düngermenge reduziert werden. Über konkrete Zahlen, die diese Annahme stützen, verfügen sie im Allgemeinen nicht.

Mittels Simulation waren deshalb für 1 ha große Prüfflächen in Abhängigkeit von verschiedenen Größen der Teilflächen Phosphorbilanzen zu ermitteln. Dabei wurde unterstellt, dass die Teilflächen auf der Basis mittlerer Phosphorgehaltsklassen und Erträge einheitlich und gemäß der Empfehlung gedüngt werden. Die größeren Teilflächen bestehen aus mehreren Prüfflächen, die 1 ha-Teilflächen stimmen mit den 1 ha-Prüfflächen überein.

7.2 Methoden

Simuliert wurden die Phosphorbilanzen für die Schlaggruppe 4, bestehend aus 16 Schlägen mit insgesamt 543 ha. Die Schlaggrößen variierten zwischen 17 und 70 ha. Die mittlere Schlaggröße betrug 34 ha. Unterstellt wurden eine schlageinheitliche Düngung und drei Varianten einer teilflächenspezifischen Düngung auf der Grundlage von Teilflächen von 9 ha, 3 ha und 1 ha Größe.

Als Basis für die Simulation dienten die Ergebnisse der Probenahme im Jahr 2001, aus der die Phosphorgehalte, Bodenarten und Probenahmepunkte übernommen wurden, sowie die Ertragsdaten aus den Jahren 1999 bis 2006. Diese Daten wurden dem Datenspeicher der Dawa entnommen.

Für jeden Schlag wurde ein 1ha-Raster über die Beprobungspunkte angepasst. Dieses Raster bildete die 1 ha-Prüfflächen bzw. die 1 ha-Teilflächen ab. Aus den 1 ha-Teilflächen wurden 3 ha- und 9 ha-Teilflächen generiert. Zusätzlich erfolgte die Betrachtung des Schlages als Ganzes.

Die Daten der 3 ha- und 9 ha-Teilflächen, d.h. die Phosphorgehalte und Erträge, wurden bestimmt, indem die Daten der jeweils mittleren 1 ha-Teilfläche für die gesamte Teilfläche übernommen wurden. Für den Gesamtschlag erfolgte eine Mittelung der Daten aller 1 ha-Teilflächen. Im Fall der 3 ha-Variante ist das abstrahierte Vorgehen bedingt praxiskonform. Eine Probenahme im erweiterten Zentrum der Teilfläche wird als repräsentativ für die gesamte Teilfläche übernommen. Im Fall der 9 ha-Teilflächen ist

dieses Vorgehen eher praxisfremd, aber trotzdem teilweise zu beobachten. Es ist ein Beispiel für eine preisgünstige, aber nicht sorgfältig durchgeführte Probenahme. Die schlageinheitliche Variante wird bei dem Vergleich begünstigt, da durch keine praxisübliche Probenahme ein ähnlich repräsentativer Wert für den Schlag ermittelt werden könnte.

Die Daten der Ertragsmessung aller einbezogenen Jahre wurden aufbereitet (Pkt. 6.2) und in Form jährlicher standardisierter (relativer) Erträge für die 1 ha-Teilflächen abgelegt. Standen für einzelne Jahre keine teilflächenspezifischen Erträge zur Verfügung, erfolgte ersatzweise eine Übernahme der schlageinheitlichen Erträge aus der Schlagkartei.

Aus den jährlichen standardisierten Erträgen wurden die standardisierten Ertragserwartungen für jedes Jahr des Untersuchungszeitraumes ermittelt, indem jeweils die Mittel der jährlichen standardisierten Erträge der drei vorangegangenen Jahre bestimmt wurden. Aus diesen erfolgte die Berechnung der voraussichtlichen (geplanten) Erträge für das Erntejahr unter Berücksichtigung der schlagabhängigen Mittel für die jeweilige Fruchtart. Die Schätzung des Phosphorentzugs aus den geplanten Erträgen geschah mittels der empfohlenen Tabellenwerte (VON WULFFEN *et al.* 2008).

Die teilflächenspezifisch vorliegenden Phosphorgehalte wurden unter Berücksichtigung der Bodenart in Phosphorgehaltsklassen umgewandelt, aus denen die Bilanzwerte abgeleitet wurden (VON WULFFEN *et al.* 2008). Der Entzug und der Bilanzwert ergaben unter Berücksichtigung der Düngeempfehlungen zusammen den Phosphorbedarf (VON WULFFEN *et al.* 2008).

Die Simulation der Phosphorbilanz der Prüfflächen erfolgte, indem von den simulierten auszubringenden Phosphormengen der Phosphorentzug aufgrund des aktuellen jährlichen Ertrages der jeweiligen Prüffläche abgezogen wurde. Die Phosphorbilanzen wurden für jede Prüffläche und jedes Jahr in Abhängigkeit von der Teilflächengröße einzeln berechnet. Aus ihnen wurden durch Mittelwertbildung die teilflächenabhängigen durchschnittlichen jährlichen Phosphorbilanzen des sechsjährigen Bilanzzeitraums für jede Prüffläche berechnet.

Ausgewertet und dargestellt wurden sowohl die Phosphorbilanz als auch der Phosphorbedarf.

7.3 Ergebnisse

Bei einem Mittelwert von $>8 \text{ mg/100 g}$ ist die Schlaggruppe im Mittel gut mit Phosphor versorgt (**Bild 54**). 40 % der 1 ha-Teilflächen weisen aber nur Phosphorgehalte von weniger als 6 mg/100 g Boden auf.

Eine teilflächenspezifische Düngung sollte zu positiven Bilanzen auf den Prüfflächen der Gehaltsklasse A und B und zu negativen Bilanzen auf den Prüfflächen der Gehaltsklasse D und E führen. Dies wird aber nur erreicht, wenn die Düngungsempfehlung für

die Prüfflächen selbst abgeleitet wird. In der Simulation entspricht dies der Variante der 1 ha-Teilflächen. Erfolgt die Düngungsempfehlung für größere Teilflächen, die aus Prüfflächen mit unterschiedlichen Gehaltsklassen bestehen, kann diese Bedingung nicht mehr durchgehend gewährleistet werden. Somit kann die Bilanz der Prüfflächen von dieser Erwartung abweichen.

Im **Bild 55** erfolgte eine Gruppierung der Prüfflächen in Abhängigkeit von der für das Jahr 2001 bestimmten P-Gehaltsklasse. Da Gehaltsklassen zwischen A und E ausgewiesen wurden, ergaben sich fünf Teilbilder. Für jede Gehaltsklasse bzw. jedes Teilbild wurde die Häufigkeit der auf den 1 ha-Prüfflächen ermittelten Bilanz, eingeteilt in Klassen, in Abhängigkeit von der simulierten Teilflächengröße dargestellt. Die 1 ha-Variante entspricht der Erwartung. Die Werte der Bilanzen häufen sich jeweils in nur ein bis zwei Klassen der Bilanz. Sie entsprechen zahlenmäßig den entsprechenden Bilanzwerten. Eine Streuung ergibt sich aufgrund der Unterschiede zwischen den geplanten und erreichten Erträgen. Auf Prüfflächen mit der Gehaltsklasse E ergeben sich negative Werte der Bilanzen, da keine Düngung erfolgte und somit auch der Entzug durch das Ernteprodukt nicht ausgeglichen wurde.

Die Werte der Bilanzen variieren stärker auf den Prüfflächen jeder einzelnen Gehaltsklasse, wenn die Düngung auf der Basis der 3 ha- bzw. 9 ha-Teilflächen erfolgte. Negative Werte der Bilanzen treten selbst auf Prüfflächen mit der Gehaltsklasse A auf und positive Werte auf Prüfflächen mit der Gehaltsklasse E. Größere Teilflächen bei der teilflächenspezifischen Düngung verursachen folglich trotz scheinbar ordnungsgemäß durchgeführter Düngung Fehldüngungen in Teilbereichen, d.h. auf einzelnen Prüfflächen.

Durch eine schlageinheitliche Düngung nimmt die Streuung der Werte der Bilanzen wieder ab. Unabhängig von der anfänglichen Gehaltsklasse der Prüfflächen variieren die Werte um den Nullbereich. Unterschiede in der Nährstoffversorgung des Bodens werden somit nicht ausgeglichen. Demgegenüber wird selbst durch teilflächenspezifische Düngung auf der Basis größerer Teilflächen (> 1 ha) im Vergleich zur schlageinheitlichen Düngung ein größerer Anteil der Gesamtfläche richtig, d.h. gemäß des vorhandenen Nährstoffniveaus der 1 ha-Prüfflächen, gedüngt. Zugleich tritt auf einem geringen Bereich der Schläge, d.h. auf einigen Prüfflächen, die vergleichsweise größte Fehldüngung auf.

Die verschiedenen Varianten der Düngung unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich ihrer Bilanzen auf den einzelnen Prüfflächen, sondern auch hinsichtlich des P-Bedarfes. Um die 3 Varianten der teilflächenspezifischen Düngung mit der schlageinheitlichen Düngung vergleichen zu können, erfolgte für jede Prüffläche die Berechnung der jeweiligen Bedarfssdifferenz. Die Summe der jeweiligen negativen Bedarfssdifferenzen entspricht einem mittleren Minderbedarf auf einem Teil der Prüfflächen, die Summe der jeweiligen positiven Bedarfssdifferenzen einem mittleren Mehrbedarf auf dem anderen Teil der Prüfflächen im Vergleich zu einer schlageinheitlichen Düngung (**Bild 56**). Un-

abhängig von der Größe der Teilfläche einer teilflächenspezifischen Düngung überwiegt der Anteil des Mehrbedarfs, d.h. auf der untersuchten Schlaggruppe ist der Düngerbedarf für eine teilflächenspezifische Düngung grundsätzlich höher als bei einer schlageinheitlichen Düngung. Der mittlere Mehrbedarf für die gesamte Schlaggruppe beträgt 7,1, 5,7 bzw. 8,1 kg/ha*Jahr für die 1 ha-, 3 ha- bzw. 9 ha-Teilflächen. Der relativ geringste Mehrbedarf wird durch die 3 ha-Teilfläche verursacht. Der erhöhte Mehrbedarf durch die 1 ha-Teilfläche hängt wahrscheinlich mit der höheren Anzahl erkannter unterversorgter Schlagbereiche zusammen. Der erhöhte Mehrbedarf durch die 9 ha-Variante kann durch eine teilflächenspezifischen Düngung auf der Grundlage unkorrekter Phosphorgehalte verursacht sein.

Die o. g. Ergebnisse entsprechen mittleren Werten, die auf der Untersuchung von 16 Schlägen mit einer Gesamtfläche von 543 ha basieren. Auf einem konkreten Schlag ergeben sich häufig andere Relationen zwischen dem P-Bedarf der einzelnen Teilflächengrößen (**Bild 57**).

Ein Mehr- bzw. Minderbedarf relativ zu einer schlageinheitlichen Düngung lässt das Ergebnis der Düngung außer Acht. Ergänzend wird deshalb der Mehr- bzw. Minderbedarf im Vergleich zum Phosphorbedarf der 1 ha-Variante, die das beste Düngungsergebnis erzielt, ausgewiesen. Diese Differenzen wurden für jede Prüffläche bestimmt, der Größe nach sortiert und stufenweise für jeweils 10 % der Gesamtfläche der Schlaggruppe zusammengefasst (**Bild 58**). Negative Differenzen besagen, dass der P-Bedarf der Vergleichsvariante geringer war, was einer notwenigen, aber unterlassenen Düngung entspricht. Positive Differenzen weisen auf eine nicht erforderliche Überdüngung hin.

Die 10 %-Flächenanteile im unteren Bereich der Ordinate zeigen die Höhe der unterlassenen Düngung, die im mittleren Bereich die ordnungsgemäße Düngung und die im oberen Bereich die Höhe der Überdüngung an. Der farbige Bereich jedes Balkens kennzeichnet die Spannweiten der Differenzen des Bedarfs in der jeweiligen Klasse. In den Klassen ohne Balken, d.h. in den mittleren Klassen, ist die Differenz gleich Null. Der Bedarf der Vergleichsvariante ist mit dem Bedarf der 1 ha-Variante identisch.

Die 3 ha-Teilflächenvariante führt zu einem übereinstimmenden Bedarf mit der 1 ha-Teilflächenvariante auf mindestens 40 % der Prüfflächen (**Bild 58**, oben links, mittlerer Ordinatensbereich). Auf weiteren 20 % der Prüfflächen, die oberhalb und unterhalb an den mittleren Bereich anschließenden 10 %-Flächenanteile, ist die Differenz gleich null oder minimal und selbst auf den anschließenden 20 % der Prüfflächen noch moderat. Große Differenzen treten dagegen in der untersten und obersten Klasse, also auf nochmals 20 % der Prüfflächen, auf.

In der 9 ha-Variante sind nur auf mindestens 20 % der Prüfflächen keine und auf weiteren 20 % der Prüfflächen keine oder geringe Differenzen zu verzeichnen (**Bild 58**, oben rechts). Auf den weiteren Prüfflächen sind die Differenzen im Vergleich zur 3 ha-Variante generell größer. Allerdings stimmen die Differenzen des Bedarfs in der untersten und höchsten Klasse mit denen der 3 ha-Variante wieder überein.

Bei der Schlag-Variante treten auf den meisten Prüfflächen vergleichbar zur 9 ha-Variante Differenzen des Bedarfs auf (**Bild 58**, unten). Die Differenzen in der untersten und obersten Klasse sind aber deutlich geringer. Durch die schlageinheitliche Düngung werden extreme Fehldüngungen vermieden.

Die Differenzen des Bedarfs können umgerechnet werden in durchschnittliche Phosphormengen, die auf 1 ha-Prüfflächen ohne Notwendigkeit ausgebracht werden (Überdüngung) und in solche, die nicht ausgebracht wurden, obwohl die Notwendigkeit bestanden hätte (Unterlassene Düngung) (**Bild 59**). Die relativ geringste Fehldüngung erfolgt durch die 3 ha-Variante. Trotzdem werden im Mittel aller Prüfflächen etwa 6 kg P je Hektar und Jahr zu viel bzw. 7 kg P je Hektar und Jahr zu wenig ausgebracht. Bei Unterstellung der 9 ha-Variante steigen diese Werte noch an. Schlageinheitliche Düngung weist den relativen Höchstwert für unterlassene Düngung auf. Die Überdüngung ist dagegen noch geringer als bei der 3 ha-Variante. Dies erklärt die Phosphoreinsparung bei der schlageinheitlichen Düngungsvariante.

7.4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Durch teilflächenspezifische Düngung auf der Grundlage größerer Teilflächen kann nicht vermieden werden, dass kleinräumig Fehldüngungen in Form von Überdüngung bzw. unterlassener Düngung auftreten. Der Anteil fehlgedüngter Bereiche wächst mit dem Anstieg der Größe der Teilflächen. Dies ist dem Fakt geschuldet, dass selbst ein exakt bestimmter mittlerer Nährstoffgehalt einer größeren Teilfläche nicht zugleich jeden der Teilbereiche der Teilfläche exakt kennzeichnet.

Eine fehlerhafte Düngung kann jedoch auch unabhängig von der Größe der Teilflächen ausgelöst werden, wenn deren Nährstoffgehalte ungenau bestimmt werden. Dies kann durch eine unsachgemäße Probenahme oder unsachgemäße Interpolation verursacht werden.

Im untersuchten Beispiel führte selbst die Düngung auf der Grundlage von 3 ha-Teilflächen im Vergleich zur Düngung auf der Grundlage von 1 ha-Teilflächen zu einer Überdüngung von im Schnitt 6 kg Phosphor je Hektar und Jahr. Etwa die gleiche Menge Phosphor wurde den Bereichen mit den Gehaltsklassen A und B vorenthalten. Die absoluten Werte wären vielleicht etwas geringer ausgefallen, wenn bei der Simulation der mittleren Phosphorgehalte der Teilflächen die Phosphorgehalte aller Prüfflächen berücksichtigt worden wären. In der Tendenz wäre das Ergebnis jedoch das Gleiche geblieben. Das eigentliche Ziel einer teilflächenspezifischen Düngung, die Nährstoffzufuhr allein auf die Teilbereiche mit den Gehaltsklassen A und B zu lenken und auf den Teilbereichen mit den Gehaltsklassen D und E auszusetzen, wird nur bedingt erreicht, wenn die Teilflächen zu groß gewählt werden. Dessen ungeachtet bewirkt auch eine teilflächenspezifische Düngung auf der Basis von 3 ha-Teilflächen im Vergleich zu einer schlageinheitlichen Düngung eine ordnungsgemäße Düngung auf dem größten Teil des

Schlag. Allerdings war die teilflächenspezifische Düngung auf ca. 20 % der Schlagfläche ungünstiger als eine flächeneinheitliche Düngung. Die Unterschiede zwischen den Varianten der teilflächenspezifischen Düngung hinsichtlich des Phosphorbedarfes sind vergleichsweise gering, hinsichtlich des Düngungsergebnisses dagegen beträchtlich. Das Verhältnis des Nutzens zum Aufwand tendiert zur teilflächenspezifischen Düngung auf der Grundlage kleiner Teilflächen.

8 Wirtschaftlichkeit

8.1 Problemstellung

Die Vorzüge einer teilflächenspezifischen Düngung auf der Grundlage kleiner Probenahme- und Teilflächen hinsichtlich einer optimalen Nährstoffverteilung sind unbestritten. Genauso unbestritten ist der Fakt, dass teilflächenspezifische Düngung, insbesondere durch die erhöhten Anforderungen an die Probenahme, Mehraufwendungen erfordert. Diesen Mehraufwendungen stehen Erlöse für Ertragssteigerungen, vorrangig auf Teilbereichen mit den Gehaltsklassen A und B, gegenüber (KERSCHBERGER *et al.* 2003). Die erwartete Rentabilität einer teilschlagspezifischen Bewirtschaftung ist daher von den Betriebsverhältnissen abhängig und nur auf Betriebsebene zu ermitteln (AUTORENKOLLEKTIV 2008). Beispielhaft erfolgte für den Betrieb Dawa eine Simulation der Wirtschaftlichkeit einer teilflächenspezifischen Phosphordüngung für Winterweizen.

8.2 Methoden

Die Simulation erfolgte für die 16 Schläge der Schlaggruppe 4. Auf diese Weise konnte auf Teilergebnisse der teilflächenspezifischen Bilanzierung zurückgegriffen werden (Pkt. 7). Die Wirtschaftlichkeit einer teilflächenspezifischen Düngung eines Schlages wurde im Vergleich zu einer schlageinheitlichen Düngung kalkuliert. Unterstellt wurden Varianten einer teilflächenspezifischen Düngung auf der Grundlage von Teilflächen von 3 ha und 1 ha Größe.

Aus dem im Pkt. 7 betrachteten Zeitraum von 2001 – 2006 diente jeweils das Jahr für die Simulation, in dem letztmalig auf dem betreffenden Schlag Winterweizen angebaut worden war. Winterweizen reagiert wie die meisten Getreidearten nur moderat auf eine Phosphordüngung. Die relativen Mehrerträge betragen im Mittel auf verschiedenen Standorten und über mehrere Jahre durchgeführter Versuche 15 % auf Böden der Gehaltsklasse A und 8 % auf Böden der Gehaltsklasse B, wenn die empfohlenen Bilanzwerte bei der Düngung berücksichtigt werden (KERSCHBERGER *et al.* 2003). Teilflächen mit der Gehaltsklasse C bleiben wegen des geringen Mehrertrags von 5 % bei der Kalkulation unbeachtet.

Um den absoluten Mehrertrag je Schlag zu ermitteln, wurde die Anzahl der 1 ha-Teilflächen je Schlag mit den Gehaltsklassen A und B mit dem jeweiligen spezifischen Mehrertrag und dem durchschnittlichen Ertrag des Schlages multipliziert. Durch

Division des absoluten Mehrertrages durch die Schlaggröße ergab sich der spezifische Mehrertrag des Schlages (dt/ha).

Für die Kalkulation des Mehrbedarfs an Phosphor diene der im Rahmen des Punktes 7 ermittelte Phosphorbedarf des ausgewählten Jahres für die entsprechenden Teilflächen und den Gesamtschlag. Der Phosphorbedarf ist abhängig vom geplanten Ertrag, der Größe der Schläge und dem Flächenanteil der einzelnen Gehaltsklassen. Der Mehrbedarf gegenüber einer schlageinheitlichen Düngung ergab sich aus der jeweiligen Differenz.

Die Kosten der Probenahme wurden von SCHNEIDER *et al.* (2008) übernommen. Sie schließen alle Mehrkosten einer teilflächenspezifischen gegenüber einer schlageinheitlichen Düngung ein.

Die finanzielle Bewertung erfolgte auf dem Preisniveau von Anfang März 2009. Für Winterweizen wurde ein Preis von 13 €/dt und für Phosphor ein Preis von 1,80 €/kg unterstellt. Die zusätzlichen Kosten für die Probenahme im 1 ha-Raster betragen 7,58 €/ha (SCHNEIDER *et al.* 2008).

8.3 Ergebnisse

Der Phosphorbedarf auf der Grundlage der 1 ha-Teilflächen wird im **Bild 60** schlagabhängig dargestellt, wobei die Schläge nach der Höhe ihres Phosphorbedarfes auf der Basis der 1 ha-Teilflächen geordnet wurden. Der Phosphorbedarf auf der Basis größerer Teilflächen zeigt in etwa die gleiche schlagabhängige Tendenz. Die konkreten Werte variieren jedoch um den für die 1 ha-Teilflächen bestimmten Bedarf. Diese Streuung ist für die 9 ha-Teilflächen größer als für die 3 ha-Teilflächen. Der Phosphorbedarf für die schlageinheitliche Düngung ist auf den meisten Schlägen im Vergleich zu dem der 1 ha-Variante geringer. Die einjährigen Ergebnisse stimmen somit im Grundsatz mit den Ergebnissen des sechsjährigen Untersuchungszeitraumes überein (**Bild 57**).

Auf der Grundlage der 1 ha-Teilflächen variieren die kalkulierten Mehrerträge auf den untersuchten Schlägen zwischen 0,4 und 4,9 dt/ha (**Bild 61**). Bedingt gleichsinnig mit dem Mehrertrag steigt auf den Schlägen auch der Mehrbedarf an Phosphor an (**Bild 61**). Dieses Verhältnis wird erst unterbrochen, wenn die Phosphorgehalte auf einem Schlag so niedrig sind, dass der Gesamtschlag in die Gehaltsklasse B bzw. A eingeordnet wird. Dann fällt der Bedarf für die teilflächenspezifische unter den Bedarf der schlageinheitlichen Düngung. Diese Konstellation gilt für die Schläge Wasserstelle und Liethe Ginfeld.

Werden der Mehrertrag und der Phosphormehrbedarf finanziell bewertet, lässt sich der Gewinn einer teilflächenspezifischen Phosphordüngung auf der Grundlage von 1 ha-Teilflächen ausweisen. Dazu wurden die Probenahmekosten mit den Kosten für den Phosphormehrbedarf zusammengefasst (**Bild 62**). Auf den meisten Schlägen führt eine teilflächenspezifische Düngung unter den angegebenen Bedingungen zu einem (positiven) Gewinn. Nur auf zwei Schlägen wäre ein Verlust von knapp 8 €/ha entstanden. Auf

sechs der 16 Schläge wird ein Gewinn von über 10 €/ha und auf 2 Schlägen ein Gewinn von mehr als 60 €/ha erreicht. Dies entspricht unter Berücksichtigung der Flächengrößen der Einzelschläge einem mittleren Gewinn von 11,60 €/ha, der auf der gesamten Schlaggruppe erzielt worden wäre.

Für größere Teilflächen kann nicht unterstellt werden, dass auf Prüfflächen mit den Gehaltsklassen A und B mit der empfohlenen Düngung auch ein entsprechender Mehrertrag erzeugt werden kann. Dieser wird nur realisiert, wenn bei Vorliegen der Gehaltsklassen A und B auch unter Berücksichtigung der empfohlenen Bilanzwerte gedüngt wird. Bei größeren Teilflächen ist dies oftmals nicht der Fall, wie folgendes Beispiel zeigt. Eine 3 ha-Teilfläche möge aus drei 1 ha-Prüfflächen mit den Gehaltsklassen A, B und C bestehen. Wir unterstellen, dass sie einheitlich auf der Basis der Gehaltsklasse B gedüngt wird. Dadurch würde auf der Prüffläche mit der Gehaltsklasse A der Mehrertrag von 15 % nicht erreicht. Der erzielbare Mehrertrag ergibt sich aus der folgenden Tabelle (**Tab. 6**).

Tabelle 6: Mehrertrag in % auf 1 ha-Prüfflächen, die auf der Basis von 3 ha-Teilflächen gedüngt werden

		1 ha-Prüffläche	
		GK A	GK B
3 ha-Teilfläche	GK A	15	8
	GK B	8	8

In unserem Beispiel würde auf den beiden Prüfflächen mit den Gehaltsklassen A und B jeweils ein Mehrertrag von 8 % erzielt werden, da die 3 ha-Teilfläche einheitlich auf der Basis der Gehaltsklasse B gedüngt würde. Das ist weniger als bei einer Düngung auf der Basis von 1 ha-Teilflächen (1 x 15 % und 1 x 8 %), aber auch weniger als häufig unterstellt wird, nämlich jeweils 8 % auf allen drei Prüfflächen.

Die Mehrfachbedingung schränkt den möglichen Mehrertrag bei einer 3 ha-Teilfläche relativ zu dem einer 1 ha-Teilfläche ein (**Bild 63**). Der auf die Schlaggruppe bezogene Mehrertrag sinkt von 2,49 dt/ha auf der Basis der 1 ha-Teilflächen auf 1,57 dt/ha auf der Basis der 3 ha-Teilflächen ab.

Dies hat gravierende Auswirkungen auf die Gewinnberechnung (**Bild 64**). Der geringere P-Bedarf von etwa 1 kg/ha sowie die geringeren Kosten für die 3 ha-Probenahme von nur 4,78 €/ha (SCHNEIDER *et al.* 2008) reichen nicht aus, um den Gewinn auf der Basis der 1 ha-Teilflächen zu halten. Der durchschnittliche Gewinn geht auf 4,68 €/ha zurück.

Die durchgeführten Wirtschaftlichkeitsberechnungen beziehen sich auf das bisher als Kompromiss zwischen Düngeergebnis und Kosten der Düngung akzeptierte 1 ha-Raster sowie das 3 ha-Raster. Wird der Qualität der Düngung und dem Schutz der Umwelt ein höherer Stellenwert eingeräumt, müsste die Probenahme auf der Basis eines noch kleineren, eines etwa ¼ ha großen Rasters, praktiziert werden. Die Kosten

der Probenahme stiegen unter der Annahme, dass die Probenahmekosten gemäß SCHNEIDER *et al.* (2008) linear extrapoliert werden dürfen, von 7,59 €/ha (1 ha-Teilflächen) auf 19,95 €/ha an. Dies entspricht einer Erhöhung um 12,36 €/ha.

Die intensivere Probenahme würde zudem zu einem gegenüber der 1 ha-Probenahme noch weiter zunehmenden Anteil des Bereiches mit kleinen Gehaltsklassen führen, sofern ähnliche Bedingungen wie auf der Siegrennbreite unterstellt würden (**Bild 65**). Der prozentuale Flächenanteil der Gehaltsklassen A und B, allerdings auch der der Gehaltsklasse E, der durch eine Probenahme im $\frac{1}{4}$ ha- bzw. 50 x 50 m-Raster aufgespürt wird, nimmt im Vergleich zu einem 1 ha-Probenahmeraster und erst recht im Vergleich zu noch größeren Probenahmerastern zu. Dieser Anteil verändert sich allerdings kaum noch, wenn eine noch intensivere Probenahme, wie sie auf einer Teilfläche der Siegrennbreite im $\frac{1}{16}$ ha- bzw. 25 x 25 m-Raster erfolgte, durchgeführt würde (**Bild 66**).

Ein größerer Anteil erkannter unterversorgter Flächen würde den Gewinn einer teilflächenspezifischen Düngung erhöhen. 1 Hektar der Gehaltsklasse A benötigt zusätzlich 50 kg/ha P und liefert einen Mehrertrag von 15 %, d.h. 11,25 dt/ha, wenn ein mittlerer Ertrag von 75 dt/ha unterstellt wird. Dem Mehraufwand für P in der Höhe von 90 €/ha stände ein Mehrertrag von 146 €/ha gegenüber.

8.4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Eine teilflächenspezifische Phosphordüngung auf der Basis von 1 ha-Teilflächen ist unter den variierenden Standortbedingungen der Dawa einer schlageinheitlichen Düngung in der Regel überlegen. Sie ist auch günstiger als eine teilflächenspezifische Düngung auf der Basis größerer Teilflächen. Der Gewinn einer teilflächenspezifischen Phosphordüngung zu Winterweizen auf der Basis des 1 ha-Rasters beträgt im Schnitt von 16 untersuchten Schlägen 11,60 €/ha bei einer Spannweite von - 8 bis zu 66 €/ha. Der Gewinn fällt auf 4,68 €/ha bei einer Spannweite zwischen -14 bis zu 56 €/ha ab, wenn 3 ha-Teilflächen genutzt werden.

Um die Kosten für den Phosphorbedarf zu senken, könnten die empfohlenen Phosphormengen reduziert werden. Allerdings würden mit einer deutlichen Verringerung des Zuschlages sowohl der Optimalertrag als auch die P-Gehaltsanreicherung verfehlt werden (KERSCHBERGER *et al.* 2007). Somit ist zu bezweifeln, ob sich auf diesem Weg auch die Wirtschaftlichkeit einer teilflächenspezifischen Düngung steigern ließe.

Der ausgewiesene Gewinn auf der Basis von 1 ha-Teilflächen würde fast reichen, um die Mehrkosten für eine Probenahme im $\frac{1}{4}$ ha-Raster aufzufangen. Damit wäre der Gewinn zwar aufgezehrt, doch zeigt das Beispiel, dass eine solch kleinräumige Probenahme die Wirtschaftlichkeit nicht grundsätzlich sprengt. Der zukünftige Einsatz von Bodensensoren würde die Probenahme-/Analysekosten zudem reduzieren. Eine teilflächenspezifische Düngung, die die wahre Nährstoffverteilung berücksichtigt und somit die Fehldüngung und die Umweltbeeinflussung minimiert, liegt somit im Bereich des wirtschaftlich Möglichen.

9 Zusammenfassung

Teilflächenspezifische Grunddüngung dient der gezielten Verteilung der Düngemittel auf einem Schlag. Unterversorgte Schlagbereiche werden aufgedüngt, eine Überdüngung gut versorgter Bereiche wird vermieden. Im Ergebnis soll die Wirtschaftlichkeit der Düngung erhöht und die Belastung der Umwelt vermindert werden.

Das Ergebnis einer teilflächenspezifischen Grunddüngung hängt nicht nur von der Ausführung, sondern ganz wesentlich von der Probenahme und Analyse sowie der Kartenerstellung ab. Das Resultat einer Probenahme und Analyse, der ermittelte Nährstoffgehalt, wird durch die Größe der Probenahmefläche und die Verteilung der Einstiche auf der Probenahmefläche beeinflusst. Die Spanne möglicher Probenahmevarianten erstreckt sich von der Verteilung aller Einstiche innerhalb eines kleinen Bereiches, der punktbezogenen Probenahme, bis zur gleichmäßigen Verteilung aller Einstiche auf der Probenahmefläche, einer Form der flächenbezogenen Probenahme.

Punktbezogene Mischproben werden stärker als flächenbezogene Mischproben durch die kleinräumige Verteilung der Nährstoffgehalte beeinflusst. Dies ist von Nachteil, wenn das Ziel der Probenahme die Ermittlung mittlerer Nährstoffgehalte von Teilflächen ist. Deshalb sind punktbezogene Mischproben nur dann zu ziehen, wenn eine anschließende Interpolation der ermittelten Nährstoffgehalte vorgesehen ist. Für eine Zuweisung der Nährstoffgehalte zu den Probenahmeflächen sind flächenbezogene Mischproben vorteilhafter.

Die Beeinflussung der ermittelten Nährstoffgehalte durch die Art der Probenahme gilt nicht nur für größere, sondern auch für 1 ha-Probenahmeflächen. Die durchgeführten Untersuchungen auf 1 ha-Probenahmeflächen offenbarten vergleichsweise hohe Normalfehler der Probenahme und Analyse im Ergebnis unterschiedlicher Probenahmevarianten.

Im Gegensatz zum o. g. Ergebnis waren die Nährstoffgehalte punktbezogener Mischproben, die jeweils im Frühjahr und Herbst in zwei aufeinander folgenden Jahren an den gleichen Positionen gezogen wurden, relativ ähnlich. Die Normalfehler lagen unter denen der Probenahmevarianten. Der Zeitpunkt der Probenahme war somit von geringerer Bedeutung als die Anordnung der Einstiche einer Mischprobe.

Die Kartenerstellung kann durch die direkte Zuweisung der ermittelten Nährstoffgehalte zu den Probenahmeflächen oder durch Interpolation erfolgen.

Die Methode der direkten Zuweisung von Nährstoffgehalten zu den Probenahmeflächen berücksichtigt nicht die räumliche Abhängigkeit der Nährstoffgehalte. Ihr Nachteil besteht in den möglicherweise sprunghaften Übergängen der Nährstoffgehalte an den Grenzen der Probenahmeflächen, die sich als krasse Wechsel zwischen den auszubringenden Nährstoffmengen auf den Applikationskarten wiederfinden würden. Infolge der Trägheit der Steuerung der Düngerstreuer bei der Anpassung an veränderte Aus-

bringmengen werden diese krassen Wechsel bei dem Düngerstreuen jedoch nicht realisiert.

Mittels Interpolation lassen sich Nährstoffgehalte an nicht beprobten Positionen unter Nutzung der Nährstoffgehalte an bekannten Positionen schätzen. Im Allgemeinen werden dazu die Nährstoffgehalte dem Mittelpunkt einer Beganglinie oder dem Mittelpunkt der Probenahme Fläche zugewiesen. Eine Interpolation liefert jedoch nur dann zuverlässige Schätzungen, wenn die Nährstoffgehalte räumlich korreliert sind. Dies kann u. a. mittels so genannter Semivarianzanalysen überprüft werden. In der Regel ist jedoch davon auszugehen, dass eine räumliche Korrelation nur vorliegt, wenn die Probenahme Flächen kleiner als 1 ha gewählt wurden. Die Verwendung flächen- anstelle punktbezogener Mischproben verbessert die räumliche Korrelation.

Bei einer speziellen Variante der Interpolation, dem Mehrpositionsprinzip, werden die Nährstoffgehalte aus flächenbezogenen Mischproben vor der Interpolation mehreren Einstichpunkten innerhalb einer Probenahme Fläche zugeordnet. Dadurch wird quasi eine Erhöhung der Probenahmedichte vollzogen. Die Schätzgenauigkeit erreicht und übertrifft teilweise die Schätzgenauigkeit, die bei einer direkten Zuweisung der Analyse Daten zu den Probenahme Flächen erzielt wird. Zugleich erzeugen die interpolierten Daten gleitende Übergänge an den Grenzen der Probenahme Flächen.

Als Kompromiss zwischen den Anliegen, die wahre Nährstoffverteilung auf einem Schlag zu erkennen und die Kosten für die Probenahme und Analyse zu begrenzen, wird die 1 ha-Probenahme angesehen. Sie gewährleistet allerdings noch nicht die zuverlässige Ermittlung der Nährstoffverteilung, wie sie für eine Grundinventur wünschenswert wäre. Ein indirektes Zeichen für die ungenügende Zuverlässigkeit der Schätzung ist die von der Probenahmevariante sowie der Art der Erzeugung der Flächenkarten verursachte Variabilität der erzeugten Karten. Diese Variabilität wirkt sich in Form unterschiedlicher Düngungsanweisungen aus. Eine deutliche Reduzierung des Schätzfehlers im Untersuchungsgebiet wurde dagegen unter Nutzung der Nährstoffgehalte einer Probenahme im 50 x 50 m-Raster ($\frac{1}{4}$ ha-Raster) erreicht.

Bei Probenahme Flächen, die die Größe von 1 ha übersteigen, ist die räumliche Abhängigkeit der Nährstoffgehalte nur noch gering oder nicht mehr vorhanden. Folglich ist auf eine Interpolation zu verzichten. In diversen betriebsüblichen GIS-Programmen sind einfache Interpolationsprogramme enthalten, z. B. das Inverse Distance Weighting (IDW), bei dessen Ausführung die räumliche Abhängigkeit der Daten nicht geprüft wird. Somit ist auch die Interpolation räumlich nicht korrelierter Nährstoffgehalte programmtechnisch möglich, aber sinnlos. Die Ergebnisse weichen von der Realität ab und erwecken nur scheinbar den Eindruck einer kleinräumig ermittelten Nährstoffverteilung. In Wirklichkeit werden Werte geschätzt, die im Bereich der mittleren Nährstoffgehalte des Schlages liegen.

Den Nachteilen großer Probenahme Flächen versucht man durch eine gezielte Probenahme, d.h. einer Probenahme unter Nutzung von Klassenflächen, zu begegnen. Klas-

senflächen entstehen durch Unterteilung eines Schlages auf der Basis eines Merkmals, dessen Daten in höherer räumlicher Dichte vorliegen. Häufig wird als Merkmal elektrische Bodenleitfähigkeit, aufgenommen mit dem Gerät EM38 im vertikalen Dipolmodus, verwendet. Die gezielte Probenahme auf der Grundlage dieses Merkmals war bei den durchgeführten Untersuchungen einer reinen Rasterbeprobung jedoch nur teilweise überlegen. Ursache für die variierenden Ergebnisse der gezielten Bodenprobenahme auf der Grundlage von Klassenflächen der elektrischen Bodenleitfähigkeit sind die von Schlag zu Schlag sich ändernden Beziehungen zwischen den Grundnährstoffgehalten und der elektrischen Bodenleitfähigkeit. Die Korrelationskoeffizienten variierten im untersuchten Betrieb innerhalb eines Intervalls von $\leq -0,5$ bis $\geq +0,5$.

Eine Probenahme auf der Basis von Klassenflächen der elektrischen Bodenleitfähigkeit ist gleich oder besser als eine Probenahme auf der Basis von Rasterflächen, wenn jeweils die gleiche Größe der Probenahmefläche zugrunde gelegt wird. Die unbekannte Beziehung zwischen den Nährstoffgehalten und der elektrischen Bodenleitfähigkeit auf dem zu beprobenden Schlag erlaubt keine Vergrößerung der Probenahmeflächen im Vergleich zur Rasterflächenbeprobung. Entscheidend für die Güte der Interpolation ist grundsätzlich die Größe der Probenahmefläche und nicht die Art ihrer Ausgrenzung.

Umfangreichere GIS-Programme bieten die Möglichkeit komplexerer Interpolationen. Durch die Einbeziehung von weiteren Daten als Kovariable in die Interpolation der Nährstoffgehalte kann z. B. versucht werden, die Schätzung zu verbessern. Vorausgesetzt wird allerdings eine möglichst enge Beziehung zwischen der Kovariablen und dem Nährstoffgehalt. Dies konnte am Beispiel des Phosphorgehaltes auf einem Schlag bestätigt werden. Auf diesem Schlag wurden gute Ergebnisse mit der Kovariablen pH-Wert erreicht, während die als Kovariable häufig vorgeschlagenen Merkmale elektrische Bodenleitfähigkeit und Ertrag die Interpolation nicht verbesserten.

Bezugnehmend auf veröffentlichte und eigene Untersuchungsergebnisse scheint es, dass bisher kein zusätzliches Merkmal identifiziert werden konnte, das die Ermittlung der Verteilung der Nährstoffgehalte generell unterstützt. Ehe deshalb zusätzliche Aufwendungen getätigt werden, um ein zusätzliches Merkmal aufzunehmen, sollte vielmehr unmittelbar die Größe der Probenahmeflächen zur Erfassung der Nährstoffgehalte reduziert werden.

Einer Verkleinerung der Probenahmeflächen bzw. einer Erhöhung der Probenahmedichte auf dem konventionellen Weg fehlt aufgrund der steigenden Aufwendungen gegenwärtig noch die Akzeptanz. In der näheren Zukunft werden deshalb Bodensensoren, insbesondere elektrochemische Sensoren, zum Einsatz kommen. Eine Plattform der Firma Veris®Technologies, auf die ein sogenannter pH-Manager zur on-the-go-Bestimmung des pH-Wertes aufgebaut werden kann, ist marktverfügbar. Der Stand der Forschung lässt erwarten, dass auch die Erfassung von Nährstoffgehalten demnächst folgen wird.

Mit dem Einsatz von Bodensensoren sind zwei Probleme verknüpft. Die Analyseverfahren werden von denen, die im Labor verwendet werden und durch Standards festgelegt sind, mehr oder weniger abweichen und anstelle von Mischproben werden Einzelproben gezogen. Im günstigsten Fall gelingt es Kalibrierfunktionen zu entwickeln, welche ermöglichen, die „neuen“ Analysewerte im Verhältnis 1:1 in die traditionellen Werte umzurechnen. Doch wird dies eher nicht der Fall sein, so dass zusätzlich zu der technischen Entwicklung der Geräte und Analyseeinheiten angepasste Düngeempfehlungen auf der Grundlage der neuen Analysewerte erarbeitet werden müssen.

Die Entnahme von Einzelproben anstelle von Mischproben für die Analyse ist dagegen kein Hindernis für die Einführung der „on-the-go“-Nährstofffassung. In den eigenen Untersuchungen führten die Nährstoffgehalte der im 25 m-Raster aufgenommenen Einzelproben zu einer höheren Schätzgenauigkeit als die Nährstoffgehalte der konventionell aufgenommenen punktbezogenen Mischproben im 50 m-Raster. Die Überlegenheit der „on-the-go“-Nährstoffbestimmung nimmt noch zu, wenn der Vergleich zu einer Probenahme im 1 ha-Raster und größer durchgeführt wird.

Bodenprobenahme und Analyse sind grundsätzlich hinreichend genau, um Veränderungen des Nährstoffzustandes eines Schlages und somit das Ergebnis durchgeführter Düngungsmaßnahmen erkennen zu können. Sind die Einstichpositionen trotz zeitlich versetzter Probenahmen ähnlich und sind die Messfehler im Analyselabor gering, wird folglich der Normalfehler minimiert, lassen sich selbst kurzfristige Veränderungen erfassen. In dem Maße, wie von diesen optimalen Voraussetzungen abgewichen wird, wird es schwieriger, zwischen der Streuung der Werte infolge des Normalfehlers der Probenahme bzw. Analyse und der wahren Veränderung der Nährstoffgehalte zu unterscheiden.

Generell stehen der Normalfehler, die Veränderung des Nährstoffgehaltes, die durch den betrachteten Zeitraum beeinflusst wird, und die Anzahl der zu untersuchenden Probenahmeflächen in einem Verhältnis zueinander. Bei einem kleinen Normalfehler und einer großen mittleren Veränderung des Nährstoffgehaltes reicht bereits die Beprobung weniger Probenahmeflächen aus, um die Veränderung sicher erfassen zu können. Bei einem größeren Normalfehler kann eine im Mittel kleinere Veränderung der Nährstoffgehalte dagegen nur durch die Beprobung einer größeren Anzahl von Probenahmeflächen abgesichert werden.

Im Gegensatz zur Veränderung der Nährstoffgehalte lässt sich die Bilanz kleiner Teilflächen unter Praxisbedingungen nur schwierig bestimmen. Die Beziehung zwischen der Bilanz und der Veränderung der Nährstoffgehalte, die die Anpassung der Düngungsstrategie an die betrieblichen Bedingungen unterstützen könnte, war im Ergebnis der Untersuchungen unsicher. Der Fehler der Ertragserfassung sowie der Fehler der Erfassung der ausgebrachten Düngermenge fällt bei der Betrachtung einer nur relativ kleinen Teilfläche offensichtlich stärker ins Gewicht. Somit muss eingeschätzt werden, dass der Aufwand zur Kalkulation realer teilflächenspezifischer Bilanzen im Vergleich zum er-

reichten Ergebnis hoch ist. Die Kontrolle des Düngungsergebnisses wird sich wahrscheinlich auf die Erfassung der Veränderung der Nährstoffgehalte beschränken.

Durch teilflächenspezifische Düngung auf der Grundlage größerer Teilflächen kann nicht vermieden werden, dass kleinräumig Fehldüngungen in Form von Überdüngung bzw. unterlassener Düngung auftreten. Der Anteil fehlgedüngter Bereiche wächst mit dem Anstieg der Teilflächengröße.

Eine Simulation ergab, dass selbst eine ordnungsgemäße Düngung auf der Grundlage von 3 ha-Teilflächen im Vergleich zur Düngung auf der Grundlage von 1 ha-Teilflächen zu einer Überdüngung von im Schnitt 6 kg Phosphor je Hektar und Jahr führte. Etwa die gleiche Menge Phosphor wurde den Bereichen mit den Gehaltsklassen A und B vorenthalten. Das eigentliche Ziel einer teilflächenspezifischen Düngung, die Nährstoffzufuhr allein auf die Teilbereiche mit den Gehaltsklassen A und B zu lenken und auf den Teilbereichen mit den Gehaltsklassen D und E auszusetzen, wurde nur bedingt erreicht. Dessen ungeachtet bewirkt auch eine teilflächenspezifische Düngung auf der Basis von 3 ha-Teilflächen im Vergleich zu einer schlageinheitlichen Düngung eine ordnungsgemäße Düngung auf dem größten Teil des Schlages. Auf ca. 20 % der Schlagfläche war die teilflächenspezifische Düngung allerdings ungünstiger als eine flächeneinheitliche Düngung.

Die Simulation zeigte auch, dass Unterschiede hinsichtlich des Phosphorbedarfes zwischen verschiedenen Größen der Teilflächen einer teilflächenspezifischen Düngung vergleichsweise gering waren, während das Düngungsergebnis variierte. Das Verhältnis des Nutzens zum Aufwand tendierte zur teilflächenspezifischen Düngung auf der Grundlage kleiner Teilflächen.

Durch eine simulierte teilflächenspezifische Phosphordüngung auf der Basis von 1 ha- und 3 ha-Teilflächen konnte im Vergleich zu einer schlageinheitlichen Düngung ein zusätzlicher Gewinn erzielt werden. Der Gewinn einer teilflächenspezifischen Phosphordüngung zu Winterweizen auf der Basis von 1 ha-Teilflächen betrug im Schnitt von 16 untersuchten Schlägen 11,60 €/ha bei einer Spannweite von - 8 bis zu 66 €/ha. Der Gewinn fiel auf 4,68 €/ha bei einer Spannweite zwischen -14 bis zu 56 €/ha ab, wenn 3 ha-Teilflächen Anwendung fanden.

Der ausgewiesene Gewinn bei einer Probenahme im 1 ha-Raster würde fast reichen, um die Mehrkosten für eine Probenahme im ¼ ha-Raster, um die Nährstoffverteilung relativ exakt zu erfassen, aufzufangen. Damit wäre der Gewinn zwar aufgezehrt, doch zeigt das Beispiel, dass eine kleinräumige Probenahme die Wirtschaftlichkeit nicht grundsätzlich sprengt. Der zukünftige Einsatz von Bodensensoren würde die Probenahme- und Analysekosten zudem reduzieren.

Eine teilflächenspezifische Düngung, die die wahre Nährstoffverteilung berücksichtigt und somit die Fehldüngung und die Umweltbeeinflussung minimiert, liegt somit im Bereich des wirtschaftlich Möglichen.

Literaturverzeichnis

- ADAMCHUK, V.I., MORGAN, M.T., ESS, D.R. (1998):** Rapid determination of soil pH for precision farming. ASAE Annual International Meeting, Orlando, Florida, USA, 12-16 July 1998, 25 pp.
- ADAMCHUK, V.I., MORGAN, M.T., ESS, D.R. (1999):** An automated sampling system for measuring soil pH. Transactions of the ASAE 42 (4): 885-891
- 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 (3): 272-294
- ADAMCHUK, V.I., MORGAN, M.T., BROUDER, S.M. (2006):** Development of an on-the-go soil pH mapping method: Analysis of measurement variability. Applied Engineering in Agriculture 22 (3): 335-344
- ADAMCHUK, V.I., LUND, E.D., REED, T.M., FERGUSON, R.B. (2007):** Evaluation of an on-the-go technology for soil pH mapping. Precision Agriculture 8 (3): 139-149
- ALBERT, E., SUNTHEIM, L. (2004):** Reduzierte Phosphatdüngung – Folgen für die Bodenfruchtbarkeit. In: Folgen negativer Nährstoffbilanzen in Ackerbaubetrieben. Tagung des Verbandes der Landwirtschaftskammern e.V. (VLK) und des Bundesarbeitskreises Düngung (BAD) am 27. und 28. April 2004 in Würzburg. Hrsg. vom Bundesarbeitskreis Düngung Frankfurt, S. 67 - 82
- ANGERMAIR, W., LORENZ, F. (2009):** Düngung nach Diagnose. Neue Landwirtschaft 9: 70 und 72
- ANONYM (2003):** Hinweise zur teilflächenspezifischen Grundnährstoff-Düngung. Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau, Zentrum für Acker- und Pflanzenbau Sachsen-Anhalt. http://www.sachsen-anhalt.de/LPSA/fileadmin/Elementbibliothek/Bibliothek_Politik_und_Verwaltung/Bibliothek_LLFG/dokumente/Acker_und_Pflanzenbau/Pflanzenern_und_Duengung/Hinweise_zur_teilflaechenspezifischen_Grundnuehrstoff.pdf
- ANONYM (2007):** Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung – DüV) vom 27. Februar 2007, Bundesgesetzblatt, Teil I (7): 221-240
- AUTORENKOLLEKTIV (2000):** Georeferenzierte Bodenprobenahme auf landwirtschaftlichen Flächen als Grundlage für eine teilflächenspezifische Düngung mit Grundnährstoffen. Standpunkt VDLUFA: 1-8
- AUTORENKOLLEKTIV (2008):** Teilflächenspezifische Düngung. In: Grunddüngung effizient gestalten. DLG-Merkblatt 349: 52-59
- BOGREKCI, I., LEE, W.S. (2005):** Spectral phosphorus mapping using diffuse reflectance of soils and grass. Biosystems Engineering 91 (3): 305-312
- BRENK, C. (1999):** Bereits sinnvoll oder noch Zukunftsmusik? Badische Bauernzeitung 37: 18-20
- BRENK, C., PASDA, G., ZERULLA, W. (1999):** Nutrient mapping of soils - a suitable basis for site-specific fertilisation? In: Stafford, J. V. (Hrsg.), Precision Agriculture '99, Part 1, Sheffield Academic Press, p. 49-59
- BRONSON, K.F., LASCANO, R.J., BOOKER, J.D., BOOKER, J., ONKEN, A.B., KEELING, J.W., ARCHER, T.L., MACHADO, S., BYNUM, E.D., JR. NESMITH, D. M., LI, H. (2000):** Grid soil sampling: comparisons of grid size with landscape- and soil texture-based sampling strategies in the Southern Plains. In: Robert, P. C., Rust, R. H., Larson, W. E. (Hrsg.), Proceedings of the

5th International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, Minnesota, USA, 16-19 July 2000, p. 1-16

BROUDER, S.M., THOM, M., ADAMCHUCK, V.I., MORGAN, M.T. (2003): Potential uses of ion-selective potassium electrodes in soil fertility management. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 34 (19-20): 2699-2726

CAMBARDELLA, C. A., MOORMANN, T.B., NOVAK, J.M., PARKIN, T.B., KARLEN, D. L., TURCO, R.F., KONOPKA, A.E. (1994): Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils. *Soil Science Society of America Journal* 58 (5): 1501-1511

CHANG JIYUL, Clay, D.E., CARLSON, C.G., MALO, D., Clay, S.A., Lee, J., ELLSBURY, M. (1999): Precision farming protocols: part 1. Grid distance and soil nutrient impact on the reproducibility of spatial variability measurements. *Precision Agriculture* 1 (3): 277-289

CHRISTY, C.D. (2004): An optical sensor for on-the-go soil constituent sensing. In: Mulla, D. (Hrsg.), *Proceedings of the 7th International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management*, Hyatt Regency, Minneapolis, USA, 25-28 July 2004, p. 242-249

DETAR, W.R., CHESSON, J.H., PENNER, J.V., OJALA, J.C. (2008): Detection of soil properties with airborne hyperspectral measurements of bare fields. *Transactions of the ASABE* 51 (2): 463-470

DOMSCH, H., SACHSE, H., ALTRICHTER, N., ZAUER, O., KREITZ, B., TÄGER-FARNY, W. (2004): Entwicklung einer low-input Lösung für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung im Betriebsmaßstab. Schlussbericht zum Projekt 99UM016 der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung.
http://service.ble.de/fpd_ble/index2.php?detail_id=1162&site_key=141&stichw_suche=teilfl%E4chenspezifische+Bewirtschaftung&zeilenzahl_zaeher=7

DUNN, B.W., BEECHER, H.G. (2007): Using electro-magnetic induction technology to identify sampling sites for soil acidity assessment and to determine spatial variability of soil acidity in rice fields. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 47 (2): 208-214

DURLESSER, H. (1999): Bestimmung der Variation bodenphysikalischer Parameter in Raum und Zeit mit elektromagnetischen Induktionsverfahren. FAM-Bericht 35, Shaker Verlag, Aachen, Diss., 120 Seiten

FLOWERS, M., WEISZ, R., WHITE, J.G. (2005): Yield-based management zones and grid sampling strategies: Describing soil test and nutrient variability. *Agronomy Journal* 97 (3): 968-982

FROGBROOK, Z.L., OLIVER, M.A. (2007): Identifying management zones in agricultural fields using spatially constrained classification of soil and ancillary data. *Soil Use and Management* 23 (1): 40-51

GE, Y., THOMASSON, J.A., MORGAN, C.L., SEARCY, S.W. (2007): VNIR diffuse reflectance spectroscopy for agricultural soil property determination based on regression-kriging. *Transaction of the ASABE* 50 (3): 1081-1092

GEBBERS, R. (2004): Grundnährstoffkartierung (P, K, Mg und pH) für die Bodenausgleichsdüngung. In: Hufnagel, J., Herbst, R., Jarfe, A. Werner, A. (Hrsg.): *Precision Farming. Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis*. KTBL-Schrift 4191. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)

GRABO, A., PÖRNECK, J. (2007): Präzisere Bedarfsermittlung. GPS-gestützte Grundbodenuntersuchung ist dem konventionellen Verfahren überlegen. *Neue Landwirtschaft* 8: 44-47

GUOSHUN, L., XINZHONG, W., ZHENGYANG, Z., CHUNHUA, Z. (2008): Spatial variability of soil properties in a tobacco field of Central China. *Soil Science* 173 (9): 659-667

- HE, Y., HUANG, M., GARCIA, A., HERNANDEZ, A., SONG, H. (2007):** Prediction of soil macronutrients content using near-infrared spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture* 58 (2): 144-153
- HERBST, R. (2002):** Bodenschätzung, geoelektrische Sondierung und pedostatistische Modellierung als Basis von digitalen Hof-Bodenkarten im Präzisen Landbau. Horn, R., Lamp, J., Sattelmacher, B. (Hrsg.), Dissertation Kiel, Schriftenreihe für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 60 Seiten
- HERBST, R. (2005):** Mehr Präzision möglich. *Neue Landwirtschaft* 2: 44-47
- HERBST, R., SCHNEIDER, M., WAGNER, P. (2008):** Investigations on the spatial variation of soil nutrients at different scales using geostatistics and data mining techniques. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Precision Agriculture*, Denver, Colorado, USA, 20-23 July 2008, CD-Rom, p. abstract_176
- HOSKINSON, R.L., POKRAJAC, D., OBRADOVIC, Z., LAZAREVIC, A. (2003):** The unpredictability of soil fertility across space and time. In: Robert, P. C. (et al.) (Hrsg.), *Proceedings of the 6th International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management*, Minneapolis, USA, 14-17 July 2002, p. 384-394
- KAPE, H.-E., VON WULFFEN, U., ROSCHKE, M. (2008):** Hinweise zur Probenahme von Boden, Pflanzen und Düngemitteln in Mecklenburg-Vorpommern (Gemeinsame Hinweise der Länder Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Mecklenburg-Vorpommern, Entwurf). Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern
- KERRY, R., OLIVER, M.A. (2005):** Maximum likelihood variograms for efficient prediction in precision agriculture. In: Stafford, J. V. (Hrsg.), *Precision Agriculture '05*, Uppsala, Sweden, p. 707-714
- KERRY, R., OLIVER, M.A. (2008):** Determining nugget: sill ratios of standardized variograms from aerial photographs to kriging sparse soil data. *Precision Agriculture* 9 (1-2): 33-56
- KERSCHBERGER, M., HEB, H., MARKS, G., SCHRÖTER, H. (2003):** Ausgewogene Ernährung- Bemessung der Grunddüngung und ihre Wirkung auf Ertrag und Qualität. *Neue Landwirtschaft* 6: 38-40
- KERSCHBERGER, M., ZORN, W., MARKS, G. (2007):** Richtwerte bestätigt. Abweichungen von den VDLUFA-Richtwerten sind unbegründet. *Neue Landwirtschaft* 8: 39-42
- KIM, H.J., HUMMEL, J.W., BIRRELL, S.J. (2004):** Sensing macronutrients in soil extracts using ion selective membranes. In: Mulla, D. (Hrsg.), *Proceedings of the 7th International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management*, Hyatt Regency, Minneapolis, USA, 25-28 July 2004, p. 104-119
- KOZAR, B., LAWRENCE, R., LONG, D. S. (2002):** Soil phosphorus and potassium mapping using a spatial correlation model incorporating terrain slope gradient. *Precision Agriculture* 3 (4): 407-417
- LAUZON, J.D., O'HALLORAN, I.P., FALLOW, D.J., VON BERTOLDI, A.P., ASPINALL, D. (2005):** Spatial variability of soil test phosphorus, potassium, and pH of Ontario soils. *Agronomy Journal* 97 (2): 524-532
- LEE, W.S., SANCHEZ, J.F., MYLAVARAPU, R.S., CHOE, J.S. (2003):** Estimating chemical properties of Florida soils using spectral reflectance. *Transactions of the ASAE* 46 (5): 1443-1453
- LEITHOLD, P., KERSCHBERGER, M. (2007):** Fast perfekte Entwicklung. Nährstoffgehalte nach wiederholter GPS-Bodenuntersuchung. *Neue Landwirtschaft* 11: 72-75
- LIEBIG, J. (1840) :** Organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agrikultur und Physiologie. Zitiert in: Meyers Großes Konversations-Lexikon (1905), Band1, S.179

- LUND, E.D., ADAMCHUK, V.I., COLLINGS, K.L., DRUMMOND, P.E., CHRISTY, C.D. (2005):** Development of soil pH and lime requirement maps using on-the-go soil sensors. In: Stafford, J. V. (Hrsg.), Precision Agriculture '05, Uppsala, Sweden, p. 457-464
- MAGRI, A., VAN ES, H. M., GLOS, M. A., COX, W. J. (2005):** Soil test, aerial image and yield data as inputs for site-specific fertility and hybrid management under maize. Precision Agriculture 6 (1): 87-110
- MALEKI, M.R., MOUAZEN, A.M., DE KETELAERE, B., RAMON, H., DE BAERDEMAEKER, J. (2008):** On-the-go variable-rate phosphorus fertilisation based on a visible and near-infrared soil sensor. Biosystems Engineering 99 (1): 35-46
- 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 (2): 131-144
- MCCARTY, G.W., REEVES, J.B. (2006):** Comparison of NFAR infrared and mid infrared diffuse reflectance spectroscopy for field-scale measurement of soil fertility parameters. Soil Science 171 (2): 94-102
- MOUAZEN, A.M., MALAKI, M.R., DE BAERDEMAEKER, J., RAMON, H. (2006):** Primary results on on-line measurement of some selected soil properties using a VIS-NIR sensor. Advances in Geocology 39: 215-222
- NIELSEN, D.R., WENDROTH, O. (2003):** Spatial and temporal statistics. Sampling field soils and their vegetation, GeoEcology Textbook, Catena, Reiskirchen, ISBN 3-923381-46-8, 398 pp.
- PENG, L., ZHI-QIANG, W., ZHENG, N. (2009):** Estimate of Soil Attributes Using the Method of Special Band and Reflectance Inflection Difference. Spectroscopy and Spectral Analysis 29 (3): 716-721
- PING, J.L., GREEN, C. J., ZARTMAN, R.E., BRONSON, K.F., MORRIS, T.F. (2008):** Spatial variability of soil properties, cotton yield, and quality in a production field. Communications in Soil Science and Plant Analysis 39 (1-2): 1-16
- SCHNEIDER, M., WAGNER, P., HERBST, R. (2008):** Ertragspotenzial sichern: Intelligente Beprobung – Grundlage für differenzierte Grunddüngung. Neue Landwirtschaft 8: 50-53
- SETHURAMASAMYRAJA, B., ADAMCHUK, V.I., MARX, D.B., DOBERMANN, A., MEYER, G.E., JONES, D.D. (2007):** Analysis of an ion-selective electrode based methodology for integrated on-the-go mapping of soil pH, potassium, and nitrate contents. Transactions of the Asabe 50 (6): 1927-1935
- SETHURAMASAMYRAJA, B., ADAMCHUK, V.I., DOBERMANN, A., MARX, D.B., JONES, D.D., MEYER, G.E. (2008):** Agitated soil measurement method for integrated on-the-go mapping of soil pH, potassium and nitrate contents. Computers and Electronics in Agriculture 60 (2): 212-225
- SOLIE, J.B., RAUN, W.R., STONE, M.L. (1999):** Submeter spatial variability of selected soil and bermudagrass production variables. Soil Science Society of America Journal 63 (6): 1724-1733
- TABI, F.O., OGUNKUNLE, A.O. (2007):** Spatial variation of some soil physico-chemical properties of an alfisol in Southwestern Nigeria. Nigerian Journal of Soil and Environmental Research 7: 82-91
- VISCARRA ROSSEL, R.A., THYLEN, L., MCBRATNEY, A.B., GILBERTSSON, M. (2004):** Development of an on-the-go soil sensing system for determinations of soil pH and lime requirement. In: Mulla, D. (Hrsg.), Proceedings of the 7th International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management, Hyatt Regency, Minneapolis, USA, 25-28 July 2004, p. 81-92
- VISCARRA ROSSEL, R.A., GILBERTSON, M., THYLEN, L., HANSEN, O., McVEY, S., MCBRATNEY, A.B. (2005):** Field measurements of soil pH and lime requirement using an on-the-go soil pH

and lime requirement measurement system. In: Stafford, J. V. (Hrsg.), Precision Agriculture '05, Uppsala, Sweden, p. 511-520

VISCARRA ROSSEL, R.A., WALVOORT, D.J.J., MCBRATNEY, A.B., JANIK, L.J., SKJEMSTAD, J.O. (2006): Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma* 131 (1-2): 59-75

VON WULFFEN, U., ROSCHKE, M., KAPE, H.-E. (2007): Gemeinsame Hinweise der Länder Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen-Anhalt zur Umsetzung der novellierten Düngeverordnung. Landesanstalt für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau des Landes Sachsen-Anhalt (LLFG), Landesamt für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung Brandenburg (LVLF), Landwirtschaftliche Fachbehörde des Landes Mecklenburg-Vorpommern

VON WULFFEN, U., ROSCHKE, M., KAPE, H.-E. (2008): Richtwerte für die Untersuchung und Beratung sowie zur fachlichen Umsetzung der Düngeverordnung (DüV). Landesanstalt für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau – Fachinformationen, veröffentlicht durch das Land Sachsen-Anhalt, 88 Seiten

WEBSTER, R., OLIVER, M.A. (2001): Geostatistics for Environmental Scientists. Wiley, J. & Sons (Hrsg.), Statistics in Practice Series, Chichester, West Sussex, ISBN 0-471-96553-7, 271 pp.

WOLLENHAUPT, N.C., WOLKOWSKI, R.P., CLAYTON, M.K. (1994): Mapping soil test phosphorus and potassium for variable-rate fertilizer application. *Journal of production agriculture* 7 (4): 441-448

YASREBI, J., SAFFARI, M., FATHI, H., KARIMIAN, N., EMADI, M., BAGHERNEJAD, M. (2008): Spatial variability of soil fertility properties for precision agriculture in southern Iran. *Journal of Applied Sciences* 8 (9): 1642-1650

ZINKEVICIUS, R. (2008): Influence of soil sampling for precision fertilizing. *Agronomy Research* 6 (Sp. Iss. SI): 423-429

Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Höhenmodell für die Betriebsflächen der Dawa auf der Basis der ATKIS-DGM-Daten des Landesamtes für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt (Vertikale Dimension überhöht dargestellt).....	77
Bild 2: Varianten der Bodenprobenahme auf den 1 ha-Probenahmeflächen	77
Bild 3: Häufigkeitsverteilungen der Nährstoffgehalte auf den Schlägen Siegrennbreite und Sandberg auf der Grundlage der flächenbezogenen Probenahmevariante PV3.....	78
Bild 4: Vergleich der Nährstoffgehalte der Probenahmevarianten untereinander mit Angabe des Korrelationskoeffizienten nach Spearman auf dem Schlag Siegrennbreite	79
Bild 5: Vergleich der Nährstoffgehalte der Probenahmevarianten untereinander mit Angabe des Korrelationskoeffizienten nach Spearman auf dem Schlag Sandberg	81
Bild 6: Räumliche Verteilung der Nährstoffgehalte der punktbezogenen Probenahmevariante PV1 sowie der flächenbezogenen Probenahmevariante PV3 auf dem Schlag Siegrennbreite.....	83
Bild 7: Räumliche Verteilung der Nährstoffgehalte der punktbezogenen Probenahmevariante PV1 sowie der flächenbezogenen Probenahmevarianten PV2 und PV3 auf dem Schlag Sandberg.....	84
Bild 8: Einstufung der Probenahmeflächen in die Nährstoffgehaltsklassen durch die punktbezogene Probenahmevariante PV1 im Vergleich zur flächenbezogenen Probenahmevariante PV3 auf dem Schlag Siegrennbreite	86
Bild 9: Einstufung der Probenahmeflächen in die Nährstoffgehaltsklassen durch die punktbezogene Probenahmevariante PV1 bzw. die flächenbezogene Probenahmevariante PV2 im Vergleich zur flächenbezogenen Probenahmevariante PV3 auf dem Schlag Sandberg.....	87
Bild 10: Häufigkeitsverteilungen der Nährstoffgehalte auf der Schlaggruppe 1.....	89
Bild 11: Vergleich der zu unterschiedlichen Probenahmezeitpunkten erfassten Nährstoffgehalte mit Angabe des Korrelationskoeffizienten nach Spearman auf der Schlaggruppe 1	89
Bild 12: Räumliche Verteilung der Nährstoffgehalte zu dem Probenahmezeitpunkt PZ1 (f07) und Veränderungen der Nährstoffgehalte zu den Probenahmezeitpunkten PZ2 (h07), PZ3 (f08) und PZ4 (f08) relativ zum Probenahmezeitpunkt PZ1 auf der Schlaggruppe 1	92
Bild 13: Einstufung der Probenahmeflächen in die Nährstoffgehaltsklassen infolge der Probenahme zu den Probenahmezeitpunkten PZ2, PZ3 und PZ4 im Vergleich zur Einstufung zum Probenahmezeitpunkt PZ1 auf dem Schlag Siegrennbreite	96
Bild 14: Allgemeine Form eines begrenzten Semivariogramms mit seinen Parametern.....	98

Bild 15: Untergliederung des Schlages Siegrennbreite in rasterförmige Teilflächengrößen unterschiedlicher Größe	98
Bild 16: Varianten zur Generierung der räumlichen Verteilung der Nährstoffgehalte, dargestellt für die 1 ha- und die 3 ha-Teilflächen	98
Bild 17: Räumliche Verteilung des Phosphorgehaltes, die durch die Generierungsvarianten GV1 bis GV4 erzeugt wird, für die Teilflächengrößen 1 ha, 3 ha und 9 ha auf dem Schlag Siegrennbreite	99
Bild 18: Absolute Fehler der Nährstoffgehalte, die durch die Generierungsvarianten GV1 bis GV4 entstehen, für die Teilflächengrößen 1 ha, 3 ha und 9 ha auf dem Schlag Siegrennbreite und für die Teilflächengrößen 3 ha und 9 ha auf dem Schlag Sandberg	100
Bild 19: Simulieren mittelräumiger Probenahmen aus einer kleinräumigen Probenahme	100
Bild 20: Lage der Validierungspunkte relativ zu den Punkten der Probenahme im 50 m-Raster	101
Bild 21: Standardisierte empirische Semivarianzkurven für die Nährstoffgehalte bei einem Probenahmeraster von 50 m (linkes Bild) sowie für den Phosphorgehalt bei unterschiedlichen Probenahmerastern (rechtes Bild)	101
Bild 22: Räumliche Verteilungen der Nährstoffgehalte auf der Basis der Probenahme im 50 m-Raster	101
Bild 23: Räumliche Verteilung der Phosphorgehaltsklassen in Abhängigkeit von dem Probenahmeraster	102
Bild 24: Veränderung der interpolierten Phosphorgehaltsklassen des 50 m-Rasters an den Validierungspunkten durch die interpolierten Phosphorgehaltsklassen des 100 m- und 200 m-Rasters sowie durch eine mittlere, schlageinheitliche Phosphorgehaltsklasse	103
Bild 25: Räumliche Verteilungen der Phosphorgehaltsklassen auf der Grundlage einer Probenahme im 100 m-Raster in Abhängigkeit von vier Anordnungen des Probenahmerasters bzw. von vier Rasterstartpunkten auf dem Schlag Siegrennbreite	103
Bild 26: Mittlerer absoluter Fehler der IDW- und Kriging-Interpolation auf der Grundlage verschiedener Probenahmeraster und Rasterstartpunkte	104
Bild 27: Untergliederung des Schlages Siegrennbreite in unterschiedliche Klassenflächen der elektrischen Bodenleitfähigkeit (EC)	104
Bild 28: Räumliche Verteilungen der Phosphorgehalte, die durch die Generierungsvarianten GV2 bis GV4 erzeugt werden, auf der Grundlage einer gezielten Probenahme für die Teilflächengrößen 3 ha und 9 ha auf dem Schlag Siegrennbreite	105
Bild 29: Direkter Vergleich der absoluten Fehler der Nährstoffgehalte auf der Basis einer Klassenflächen- bzw. Rasterbeprobung, die durch die Generierungsvarianten GV2 bis GV4 entstehen, für die Teilflächengrößen 3 ha und 9 ha auf den Schlägen Siegrennbreite und Sandberg	106
Bild 30: Unterteilung der Schlaggruppe 2 in gleichmäßige Rasterflächen und in auf der elektrischen Bodenleitfähigkeit basierende Klassenflächen	107

Bild 31: Häufigkeitsverteilungen der Nährstoffgehalte sowie der elektrischen Bodenleitfähigkeit auf der Schlaggruppe 2	107
Bild 32: Die Phosphorgehalte im Verhältnis zu den Schlaggrenzen und zu den Raster- bzw. Klassenflächen	108
Bild 33: Absolute Fehler der Nährstoffgehalte, die durch die Generierungsvarianten GV3 und GV4 entstehen, für gleichgroße Klassen- (EC-TF) und Rasterflächen auf der Schlaggruppe 2	108
Bild 34: Korrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen der elektrischen Bodenleitfähigkeit und den Nährstoffgehalten auf dem Schlag Siegrennbreite (Daten 2007).....	108
Bild 35: Häufigkeitsverteilung der Korrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen der elektrischen Bodenleitfähigkeit und den Nährstoffgehalten auf Schlägen der Dawa	109
Bild 36: Untersuchte Rastergrößen für die Interpolation mit Kovariablen	109
Bild 37: Standardisierte Semivariogramme für Phosphor und die Kovariablen auf der Basis des 35 m-Rasters	110
Bild 38: Semivariogramme der Residuen der linearen Regressionsmodelle ohne und mit Kovariablen	110
Bild 39: Fehler (RMSE) der Kreuzvalidierung bei räumlicher Modellierung mit dem 35 m, 50 m und 100 m Datensatz.....	110
Bild 40: Räumliche Verteilungen der Phosphorgehalte infolge Kriging ohne Kovariable (linkes Bild) und Kriging mit external drift unter Nutzung aller Kovariablen (rechtes Bild).....	111
Bild 41: Mittlerer Fehler (RMSE) der Simulation nach 500 Iterationen in Abhängigkeit von der Anzahl der Einstiche und dem Radius der kreisförmigen Beganglinie.....	111
Bild 42: Teilschläge der Schläge Siegrennbreite und Sandberg mit der Verteilung der elektrischen Bodenleitfähigkeit (EC).....	111
Bild 43: Häufigkeitsverteilungen der Nährstoffgehalte auf den 16 ha-Teilflächen der Schläge Siegrennbreite und Sandberg auf der Basis der Probenahme im 50 m-Raster.....	112
Bild 44: Räumliche Verteilungen der Nährstoffgehalte auf der Grundlage einer Einzelprobenahme im 25 m-Raster und einer Mischprobenahme im 50 m-Raster auf der Siegrennbreite.....	113
Bild 45: Räumliche Verteilungen der Nährstoffgehalte auf der Grundlage einer Einzelprobenahme im 25 m-Raster auf dem Sandberg.....	114
Bild 46: Semivarianzkurven der Nährstoffgehalte für das 25 m- und 50 m-Raster auf der Siegrennbreite (N / S = Nugget-Sill-Verhältnis; R = Range)	114
Bild 47: Semivarianzkurven der Nährstoffgehalte für das 25 m-Raster auf dem Sandberg (N / S = Nugget-Sill-Verhältnis; R = Range).....	115
Bild 48: Mittlerer absoluter Fehler der Nährstoffgehalte infolge Interpolation der im 25 m- und 50 m-Raster bestimmten Nährstoffgehalte	116

Bild 49: Veränderung der Phosphorgehalte und die Bilanzen für den Zeitraum zwischen dem Frühjahr 2007 und Herbst 2008 auf der Schlaggruppe 1	116
Bild 50: Veränderung der Kalium- und Magnesiumgehalte und die Bilanzen für den Zeitraum zwischen dem Frühjahr 2007 und Herbst 2008 auf der Schlaggruppe 1	117
Bild 51: Häufigkeitsverteilungen der Nährstoffgehalte auf der Schlaggruppe 3 im Jahr 2001	118
Bild 52: Die Bilanzen und die Veränderung der Phosphorgehalte im Zeitraum zwischen den Jahren 2001 und 2007 auf der Schlaggruppe 3.....	118
Bild 53: Die Bilanzen und die Veränderung der Kalium- und Magnesiumgehalte im Zeitraum zwischen den Jahren 2001 und 2007 auf der Schlaggruppe 3.....	119
Bild 54: Die Häufigkeitsverteilung des P-Gehaltes auf der Schlaggruppe 4.....	120
Bild 55: Häufigkeit des Auftretens mittlerer Phosphorbilanzklassen eines sechsjährigen Bilanzzeitraums auf 1 ha-Prüfflächen, sortiert nach den Gehaltsklassen zu Beginn des Bilanzzeitraumes, bei Simulation unterschiedlicher Teilflächengrößen der Probenahme bzw. Düngung auf der Schlaggruppe 4	120
Bild 56: Mittlere Unterschiede im Einsatz des Phosphors auf der Basis von Teilflächen im Vergleich zum Gesamtschlag im Verlauf eines simulierten sechsjährigen Bilanzzeitraumes auf der Schlaggruppe 4.....	121
Bild 57: Phosphorbedarf bei schlageinheitlicher Düngung sowie teilflächenspezifischer Düngung auf der Grundlage von 1 ha-, 3 ha- und 9 ha-Teilflächen auf den Schlägen der Schlaggruppe 4	122
Bild 58: Unterschiede der Phosphorbilanzen auf der Basis größerer Teilflächen im Vergleich zu 1 ha-Teilflächen im Verlauf eines simulierten sechsjährigen Bilanzzeitraumes auf der Schlaggruppe 4, klassiert für jeweils 10 % der Gesamtfläche	122
Bild 59: Mittlere Unterschiede im Einsatz des Phosphors auf der Basis größerer Teilflächen im Vergleich zu 1 ha-Teilflächen im Verlauf eines simulierten sechsjährigen Bilanzzeitraumes auf der Schlaggruppe 4.....	123
Bild 60: Phosphorbedarf bei teilflächenspezifischer Düngung auf der Grundlage von 1 ha-, 3 ha- und 9 ha-Teilflächen sowie bei schlageinheitlicher Düngung für 16 Schläge der Schlaggruppe 4 in einem Jahr mit Winterweizenanbau	123
Bild 61: Winterweizenmehrertrag und Phosphormehrbedarf einer teilflächenspezifischen Grunddüngung auf der Basis von 1 ha-Teilflächen im Vergleich zu einer schlageinheitlichen Düngung für 16 Schläge der Schlaggruppe 4 in einem Jahr mit Winterweizenanbau	124
Bild 62: Faktoren des finanziellen Ergebnisses und Gewinn einer teilflächenspezifischen Grunddüngung auf der Basis von 1 ha-Teilflächen im Vergleich zu einer schlageinheitlichen Düngung für 16 Schläge der Schlaggruppe 4 in einem Jahr mit Winterweizenanbau.....	124
Bild 63: Winterweizenmehrertrag einer teilflächenspezifischen Grunddüngung auf der Basis von 1 ha- und 3 ha-Teilflächen im Vergleich zu einer	

schlageinheitlichen Düngung für 16 Schläge der Schlaggruppe 4 in einem Jahr mit Winterweizenanbau	125
Bild 64: Faktoren des finanziellen Ergebnisses und Gewinn einer teilflächen-spezifischen Grunddüngung auf der Basis von 3 ha-Teilflächen im Vergleich zu einer schlageinheitlichen Düngung für 16 Schläge der Schlaggruppe 4 in einem Jahr mit Winterweizenanbau.....	125
Bild 65: Flächenanteile der Nährstoffgehaltsklassen in Abhängigkeit verschiedener Probenahmeraster (1/4 ha bis 9 ha) auf der Siegrennbreite.....	126
Bild 66: Flächenanteile der Nährstoffgehaltsklassen in Abhängigkeit verschiedener Probenahmeraster (1/16 ha bis 1 ha) auf einer 16 ha-Teilfläche der Siegrennbreite	126

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die absoluten Differenzen der Nährstoffgehalte zwischen verschiedenen Probenahmevarianten auf den Schlägen Siegrennbreite und Sandberg für 50 % (P50) bzw. 90 % (P90) der Probenahmeflächen	15
Tabelle 2: Normalfehler für Probenahme und Laboranalyse gemäß Grabo & Pößneck 2007 und gemäß eigener Untersuchungen	17
Tabelle 3: Die absoluten Differenzen der Nährstoffgehalte zwischen den Probenahmezeitpunkten auf der Schlaggruppe 1 für 50 % (P50) bzw. 90 % (P90) der Probenahmeflächen	20
Tabelle 4: Normalfehler für Probenahme und Laboranalyse gemäß GRABO & PÖßNECK 2007 und gemäß eigener Untersuchungen	22
Tabelle 5: Spearman-Korrelationen zwischen Phosphor und den gewählten Hilfsgrößen	38
Tabelle 6: Mehrertrag in % auf 1 ha-Prüfflächen, die auf der Basis von 3 ha-Teilflächen gedüngt werden.....	59

Abbildungen

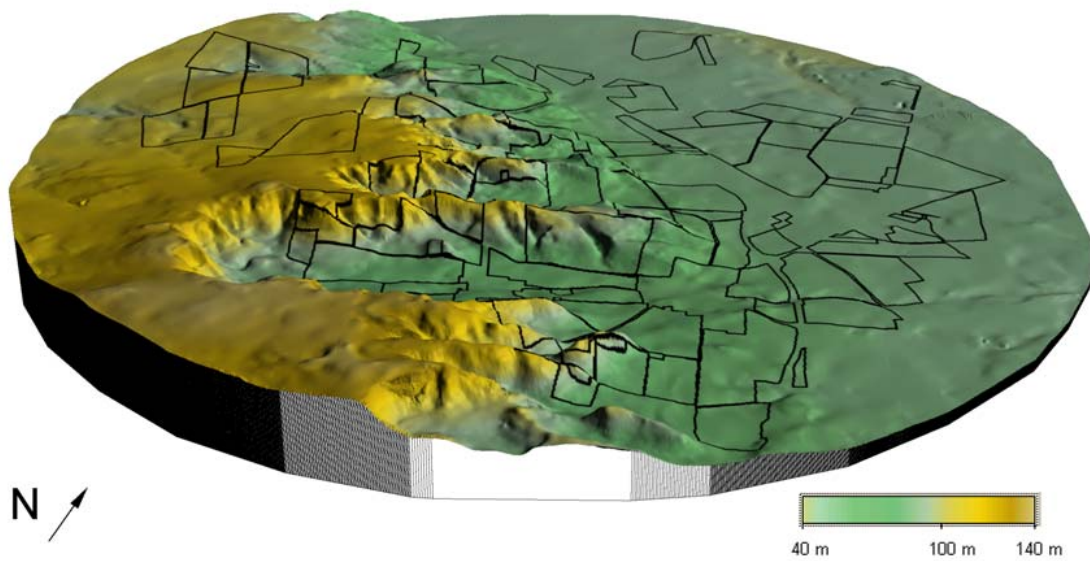


Bild 1: Höhenmodell für die Betriebsflächen der Dawa auf der Basis der ATKIS-DGM-Daten des Landesamtes für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt (Vertikale Dimension überhöht dargestellt)



Bild 2: Varianten der Bodenprobenahme auf den 1 ha-Probenahmeflächen

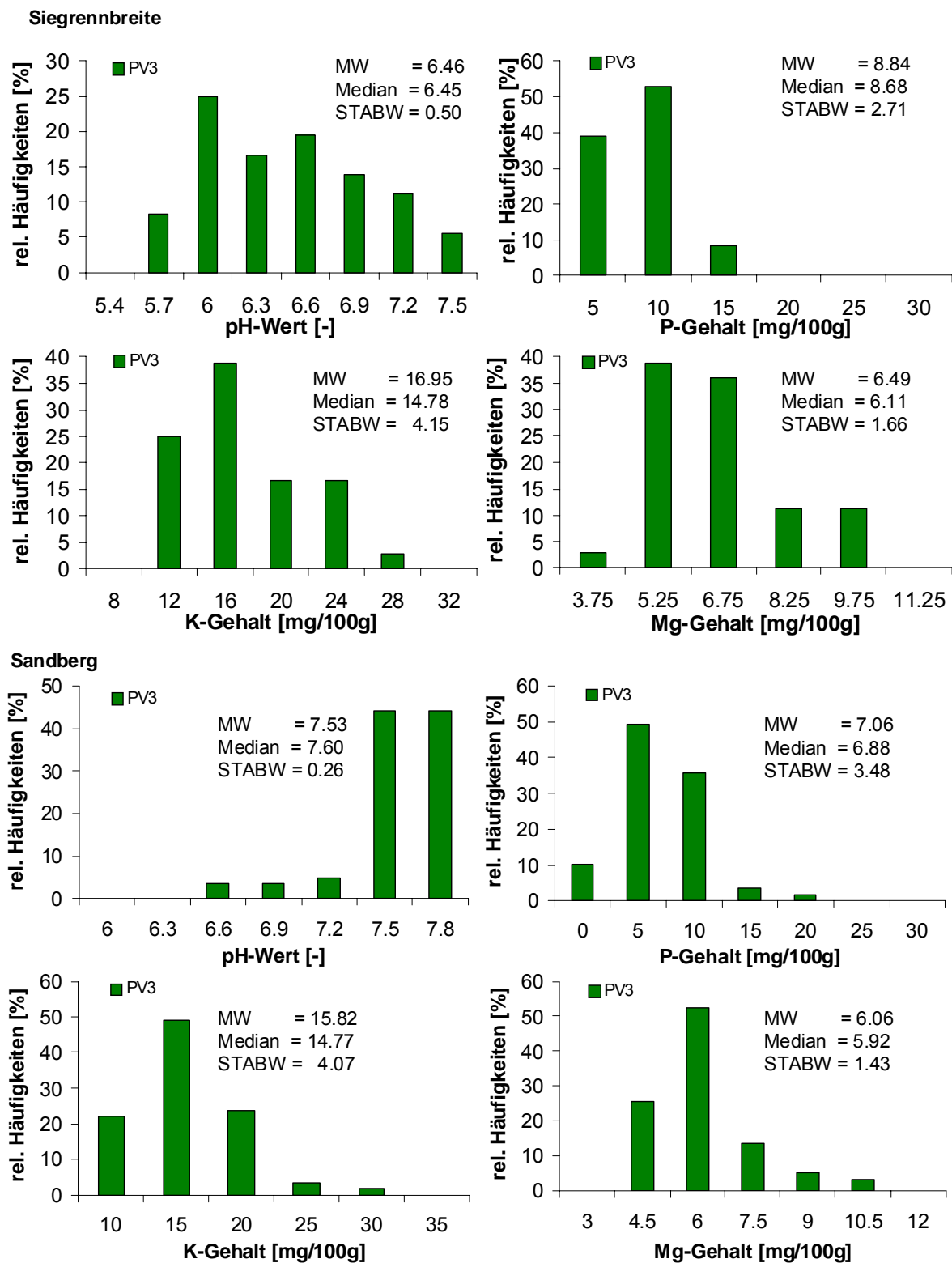


Bild 3: Häufigkeitsverteilungen der Nährstoffgehalte auf den Schlägen Siegrennbreite und Sandberg auf der Grundlage der flächenbezogenen Probenahmevariante PV3

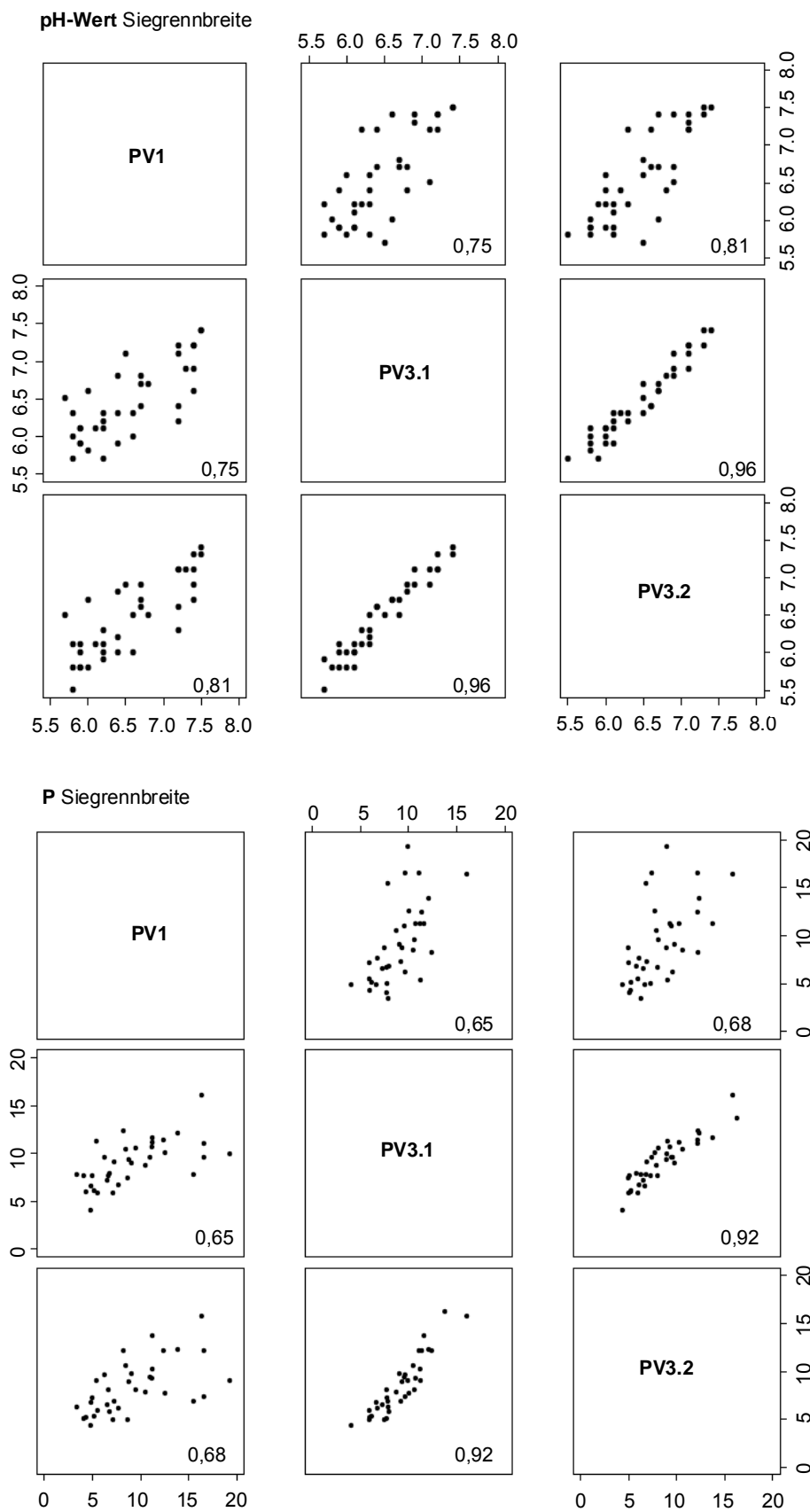


Bild 4: Vergleich der Nährstoffgehalte der Probenahmevarianten untereinander mit Angabe des Korrelationskoeffizienten nach Spearman auf dem Schlag Siegrennbreite

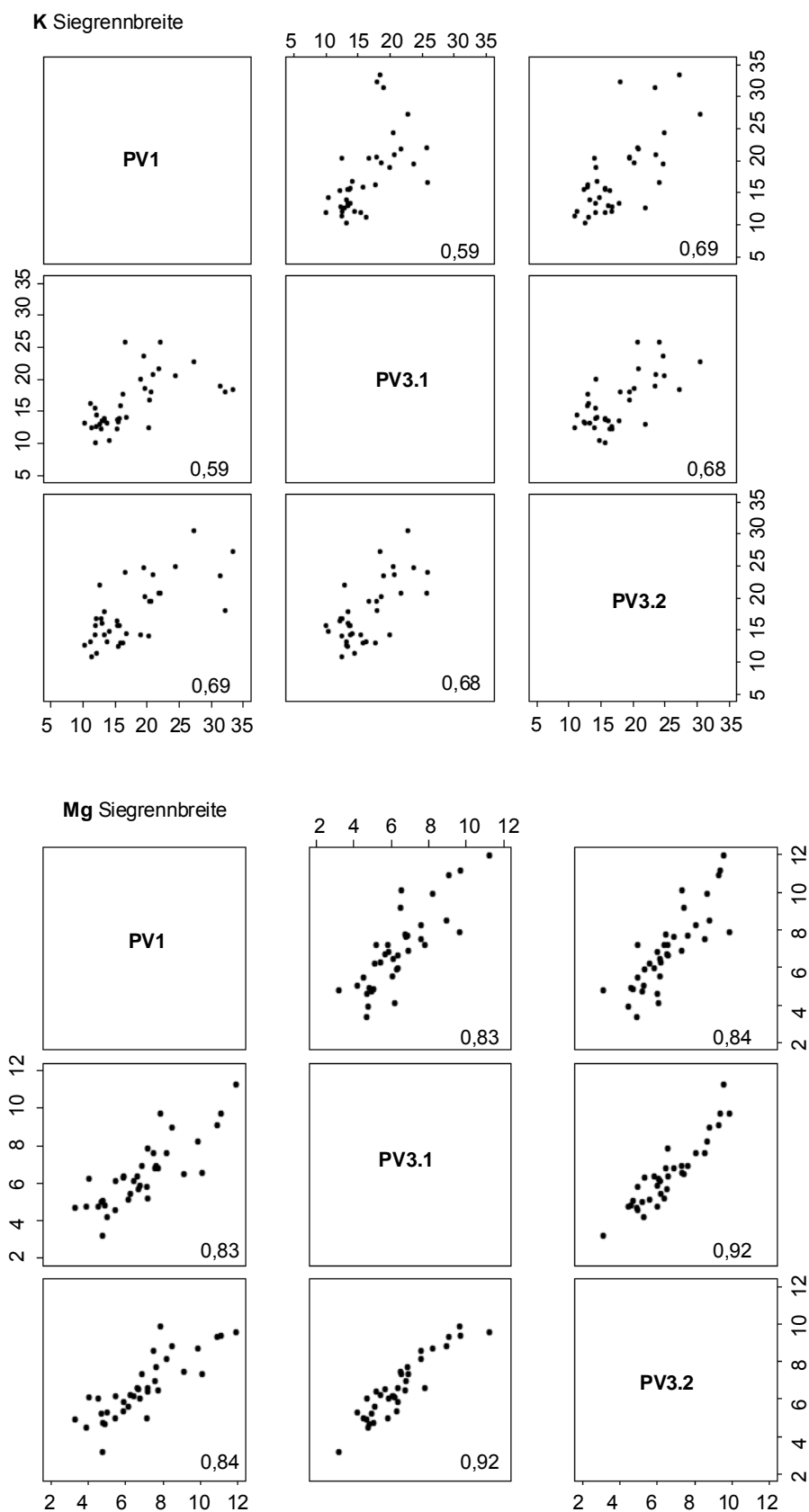


Bild 4: Fortsetzung

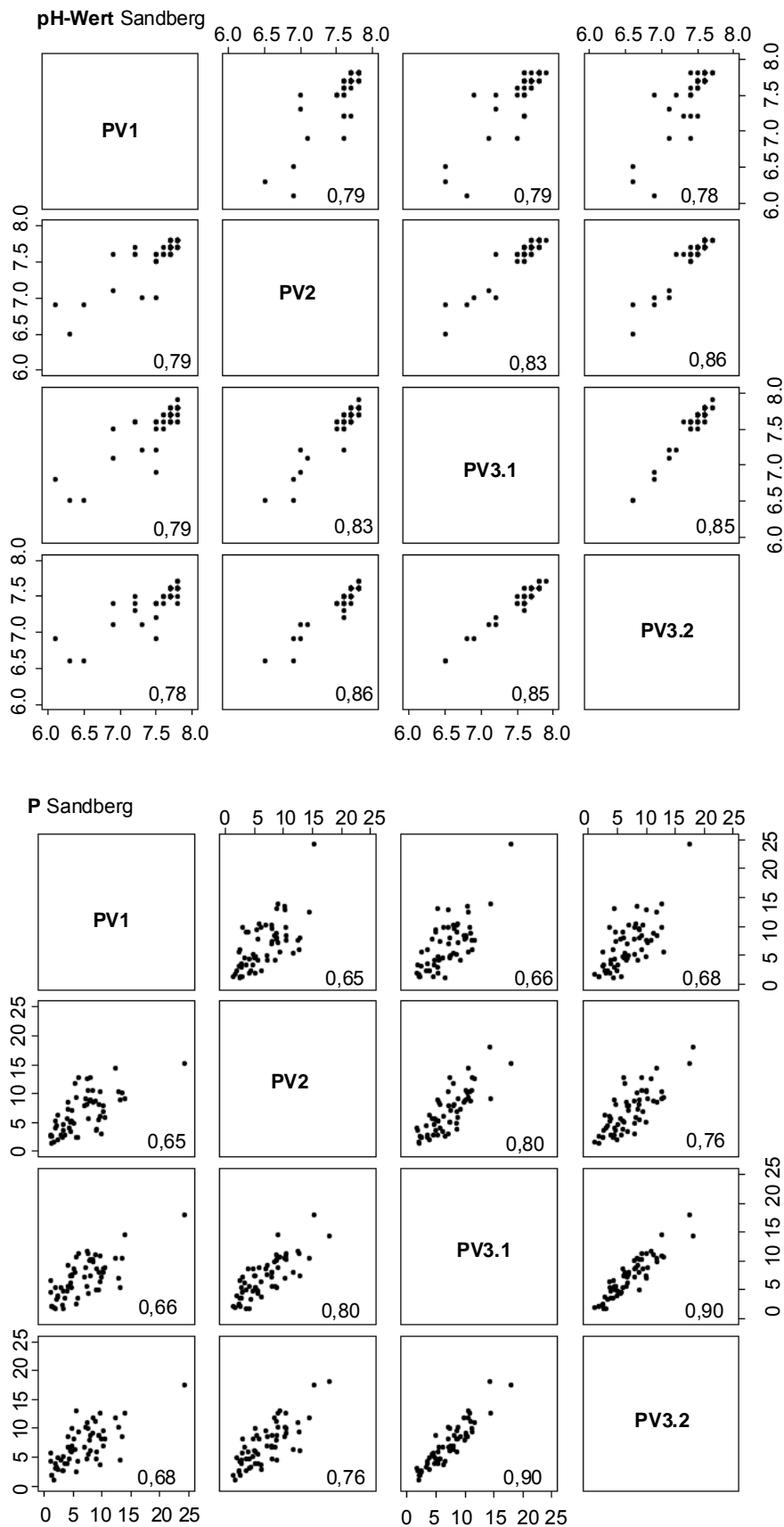


Bild 5: Vergleich der Nährstoffgehalte der Probenahmevarianten untereinander mit Angabe des Korrelationskoeffizienten nach Spearman auf dem Schlag Sandberg

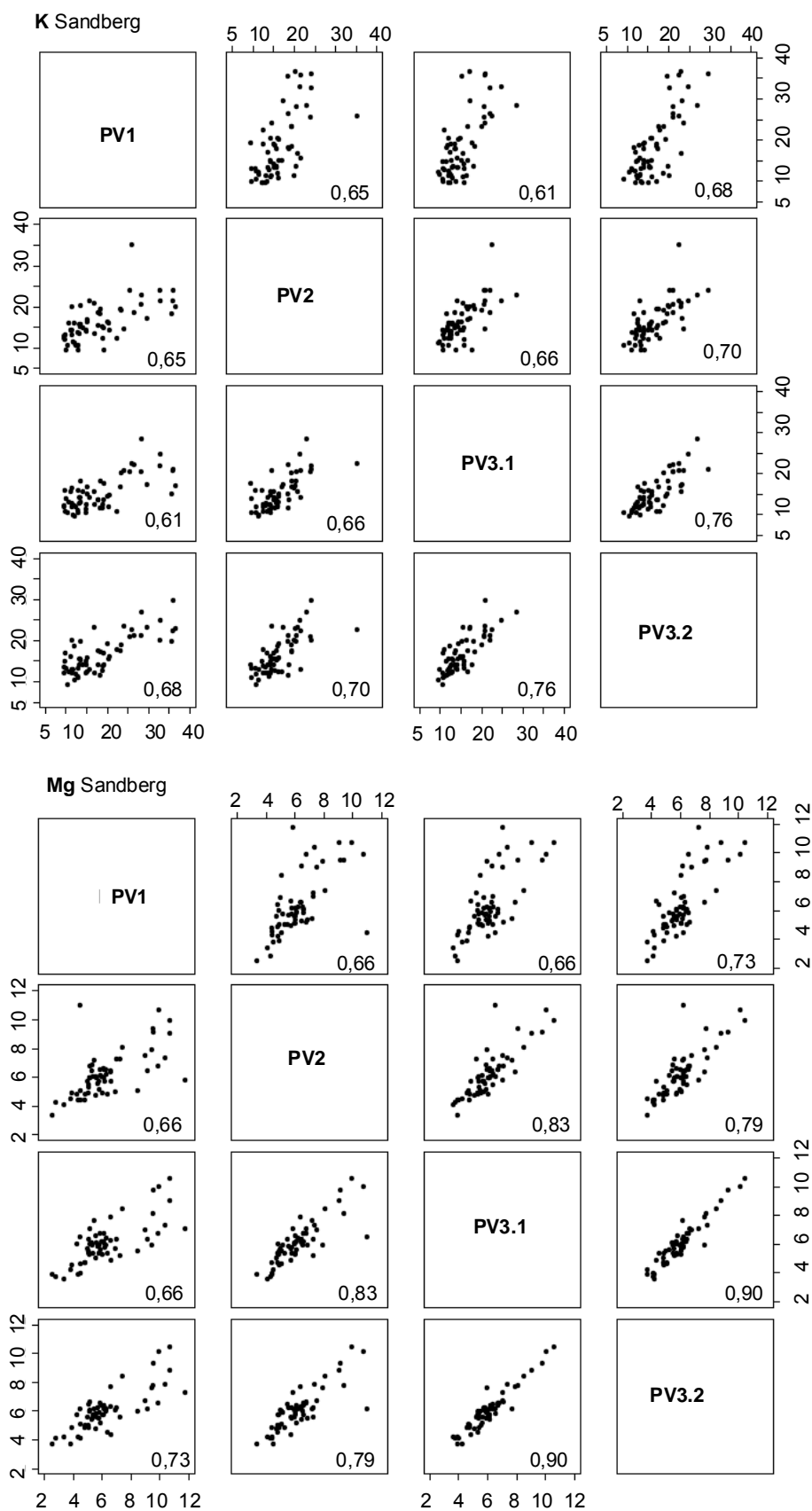


Bild 5: Fortsetzung

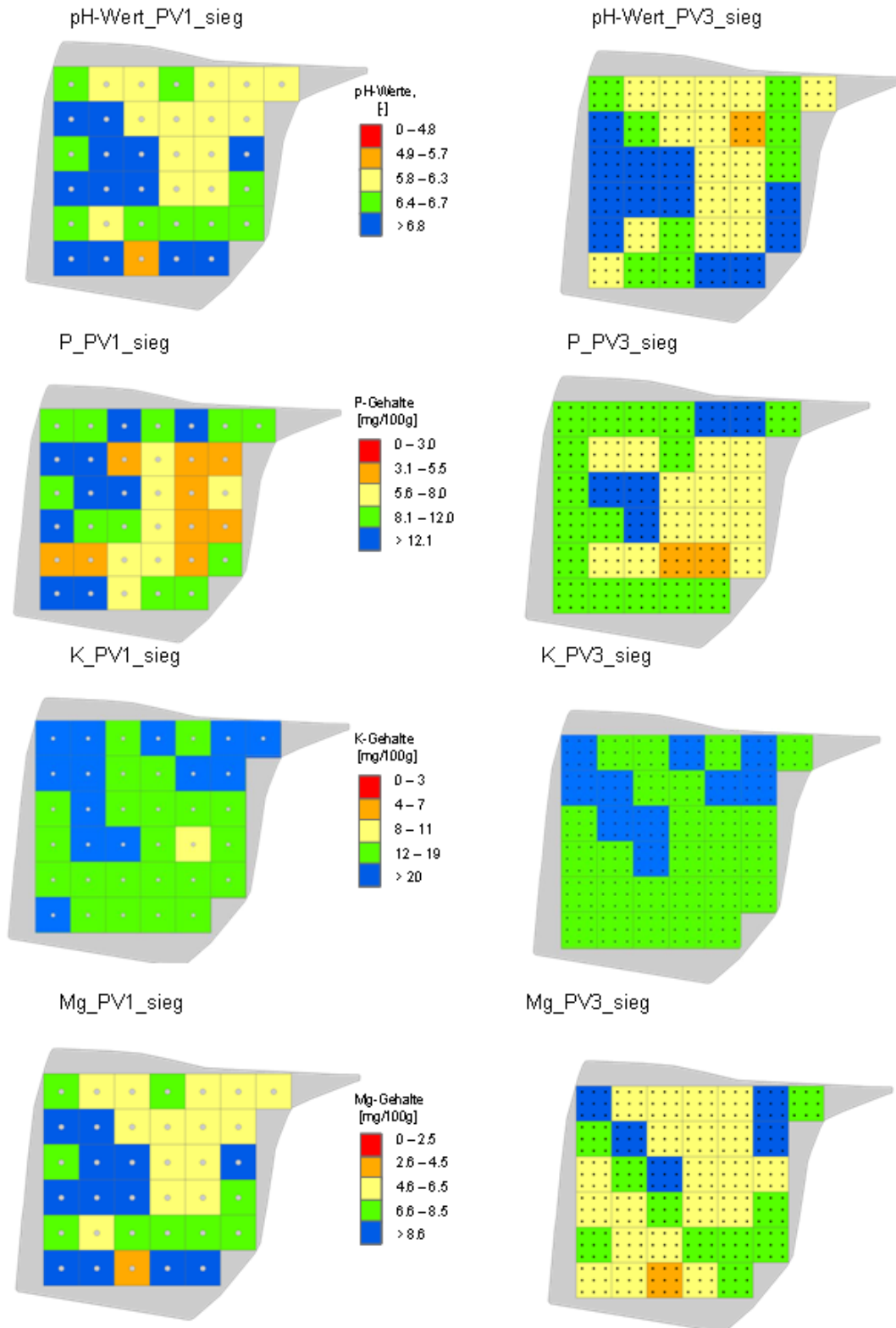
Siegrennbreite

Bild 6: Räumliche Verteilung der Nährstoffgehalte der punktbezogenen Probenahmevariante PV1 sowie der flächenbezogenen Probenahmevariante PV3 auf dem Schlag Siegrennbreite

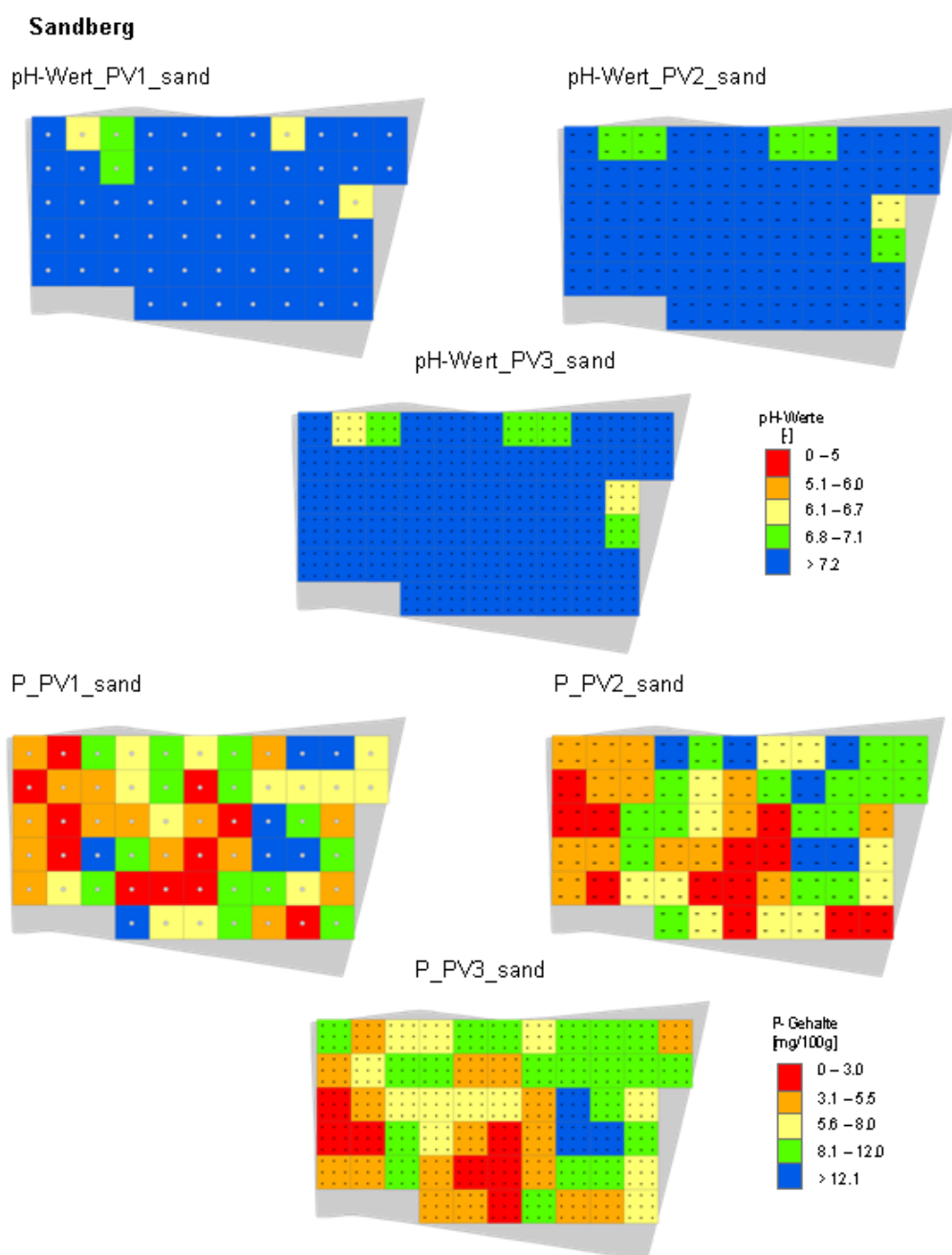


Bild 7: Räumliche Verteilung der Nährstoffgehalte der punktbezogenen Probenahmevariante PV1 sowie der flächenbezogenen Probenahmevarianten PV2 und PV3 auf dem Schlag Sandberg

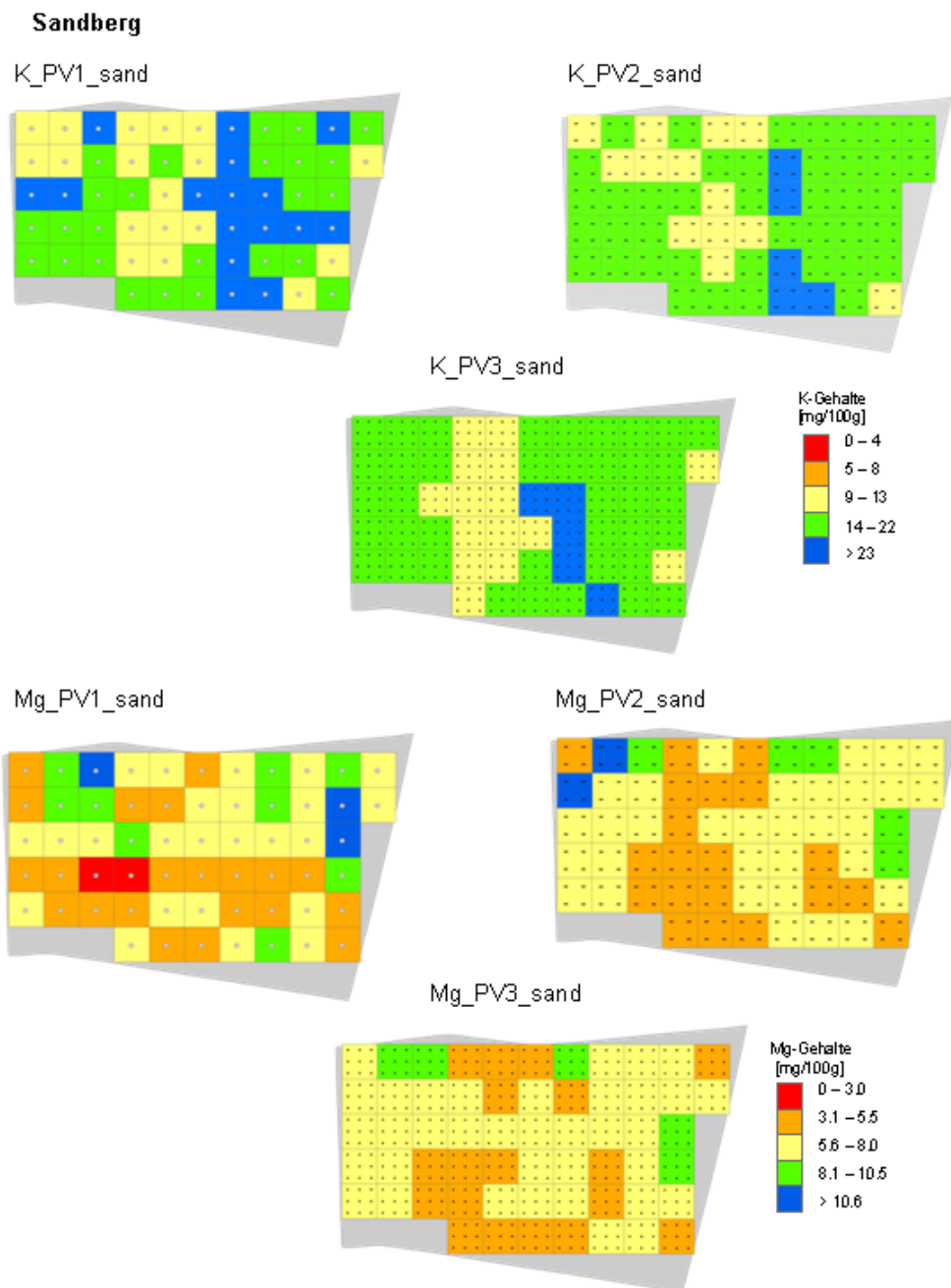


Bild 7: Fortsetzung

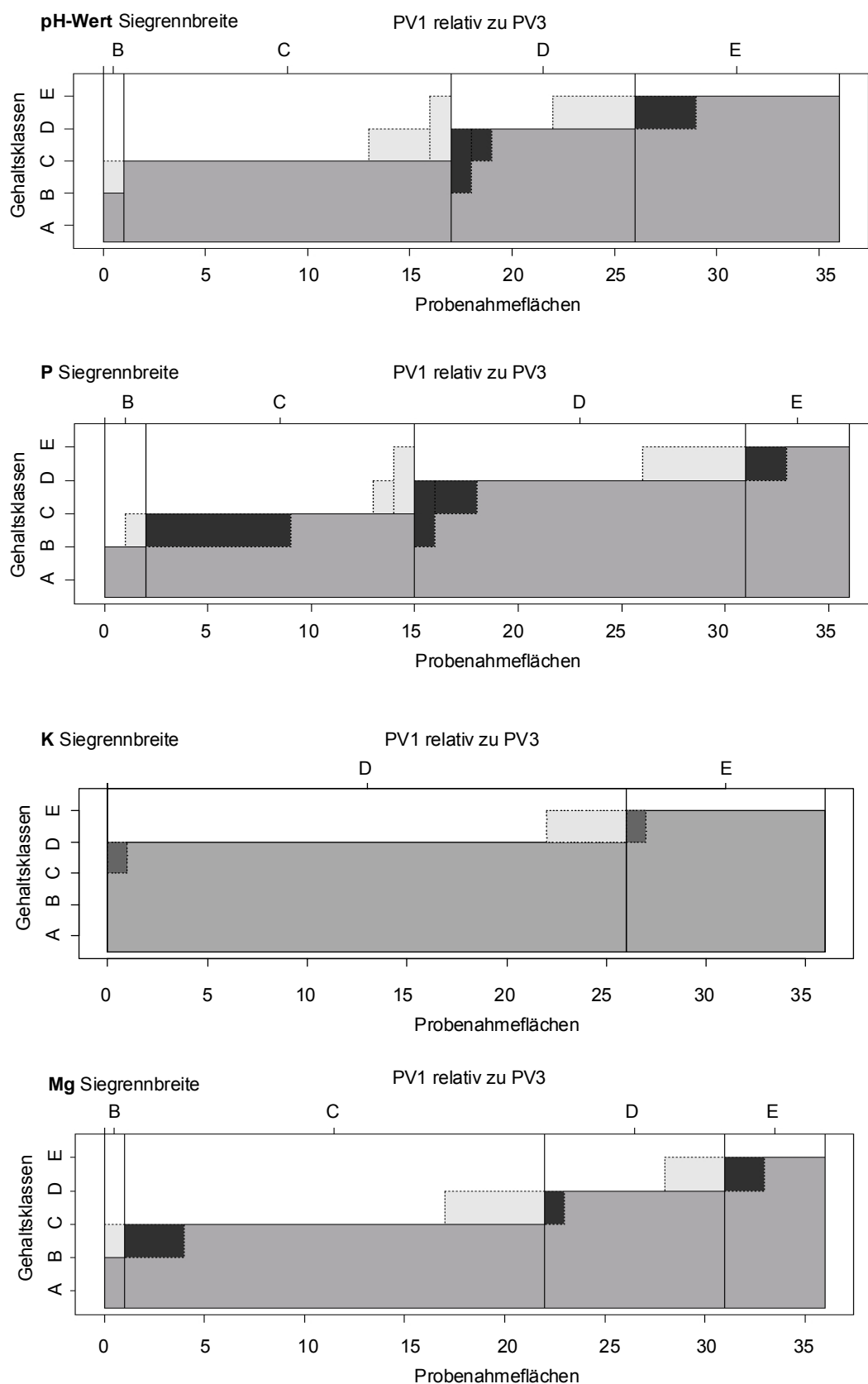


Bild 8: Einstufung der Probenahme­flächen in die Nährstoffgehaltsklassen durch die punktbezogene Probenahmevariante PV1 im Vergleich zur flächenbezogenen Probenahmevariante PV3 auf dem Schlag Siegrennbreite

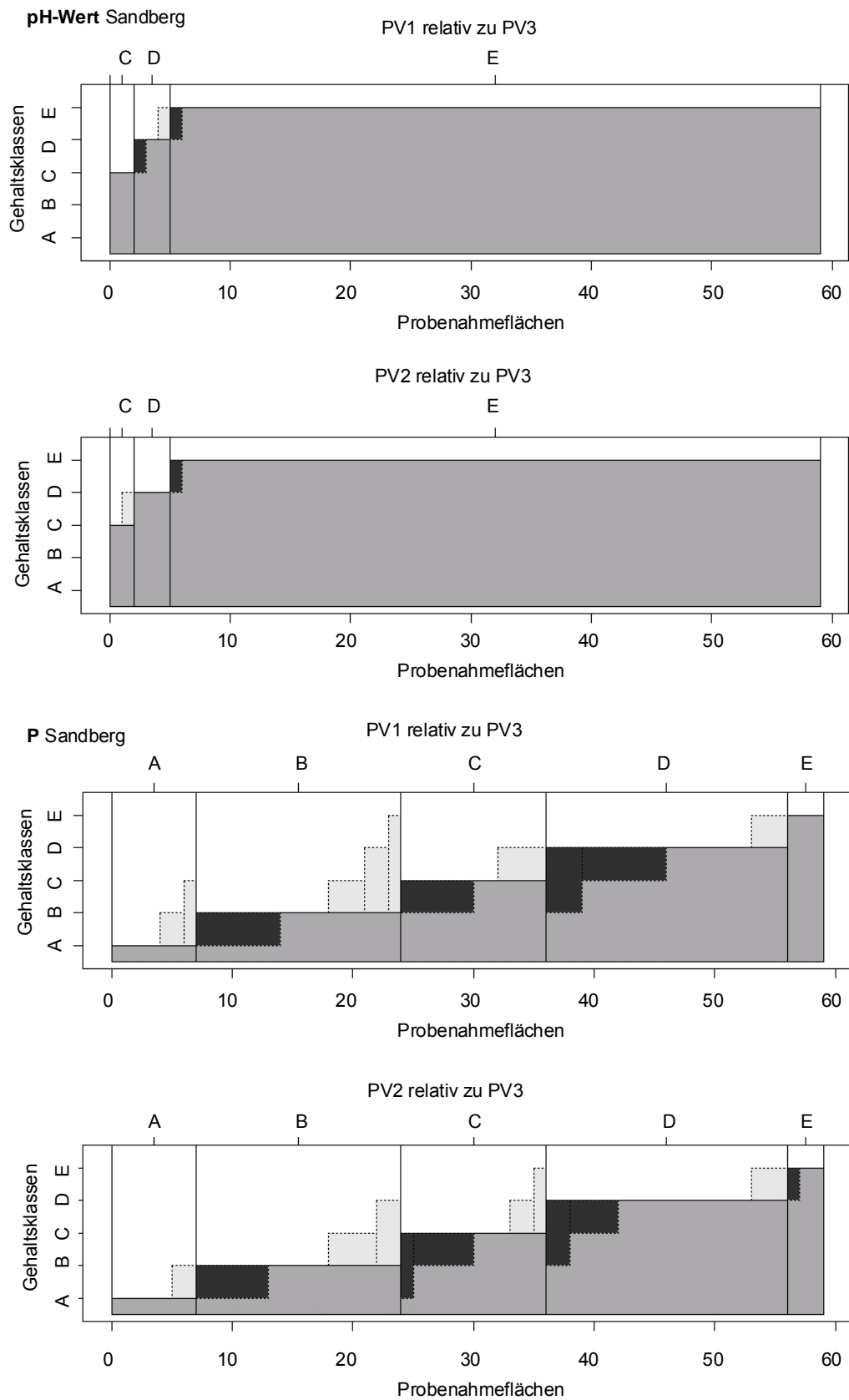


Bild 9: Einstufung der Probenahme­flächen in die Nährstoffgehaltsklassen durch die punktbezogene Probenahmevariante PV1 bzw. die flächenbezogene Probenahmevariante PV2 im Vergleich zur flächenbezogenen Probenahmevariante PV3 auf dem Schlag Sandberg

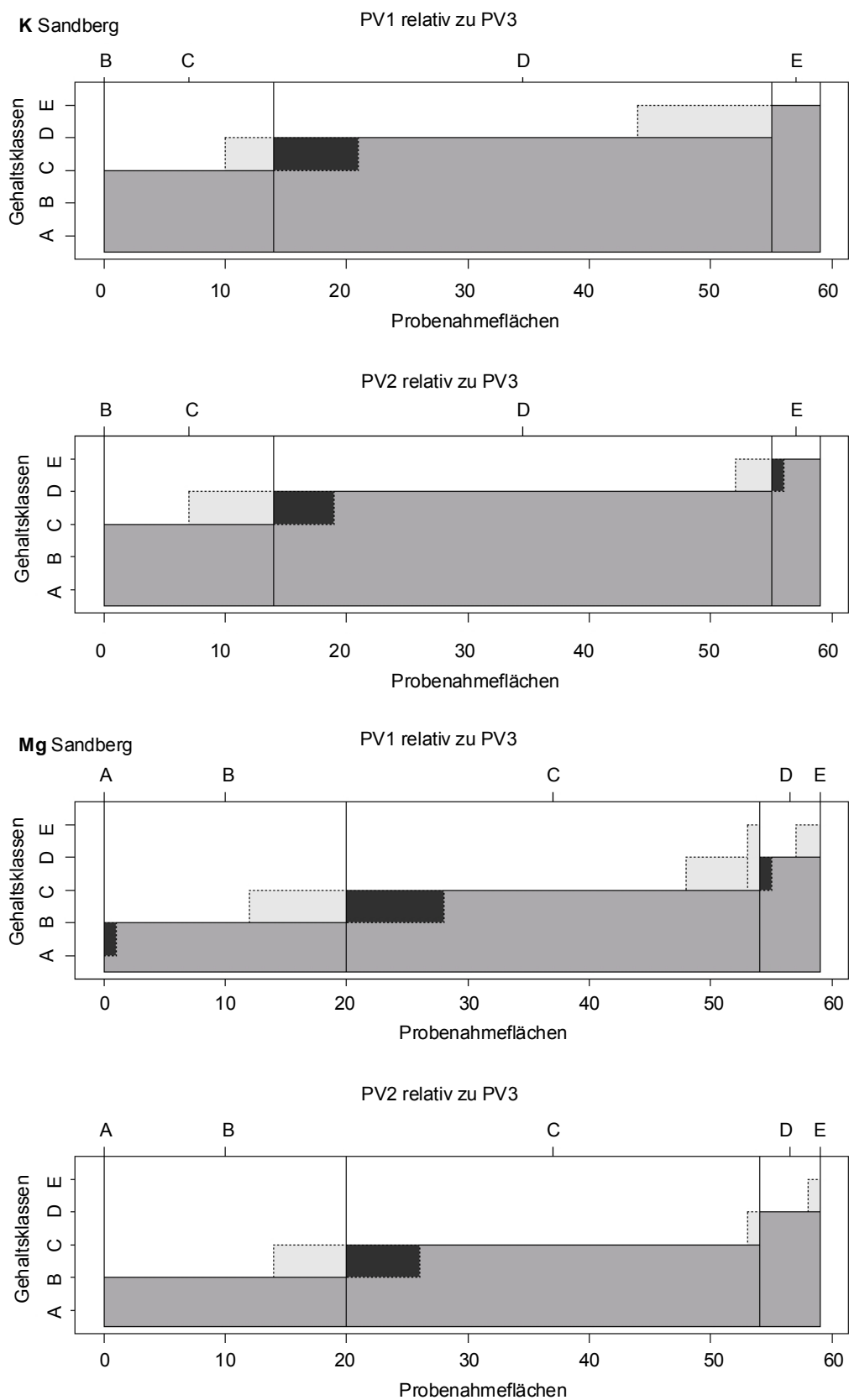


Bild 9: Fortsetzung

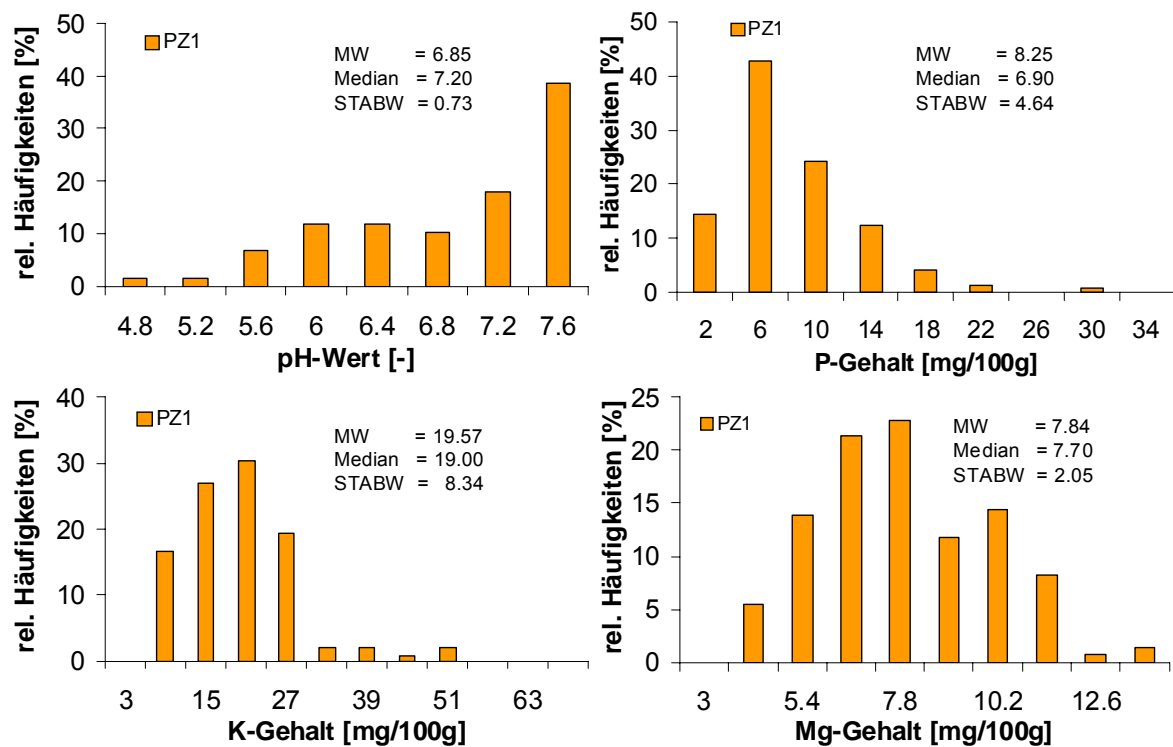


Bild 10: Häufigkeitsverteilungen der Nährstoffgehalte auf der Schlaggruppe 1

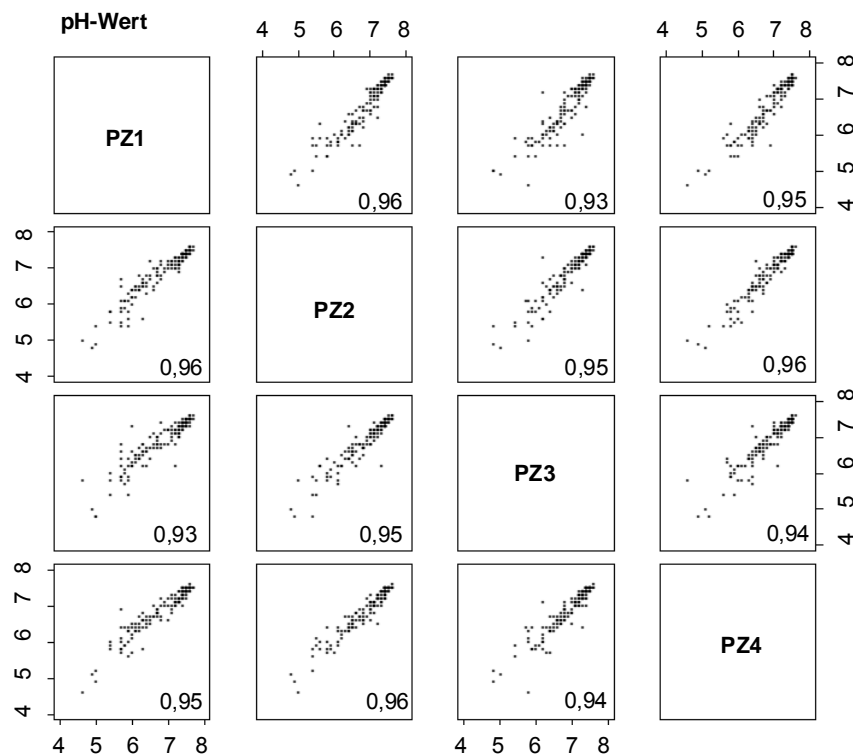


Bild 11: Vergleich der zu unterschiedlichen Probenahmezeitpunkten erfassten Nährstoffgehalte mit Angabe des Korrelationskoeffizienten nach Spearman auf der Schlaggruppe 1

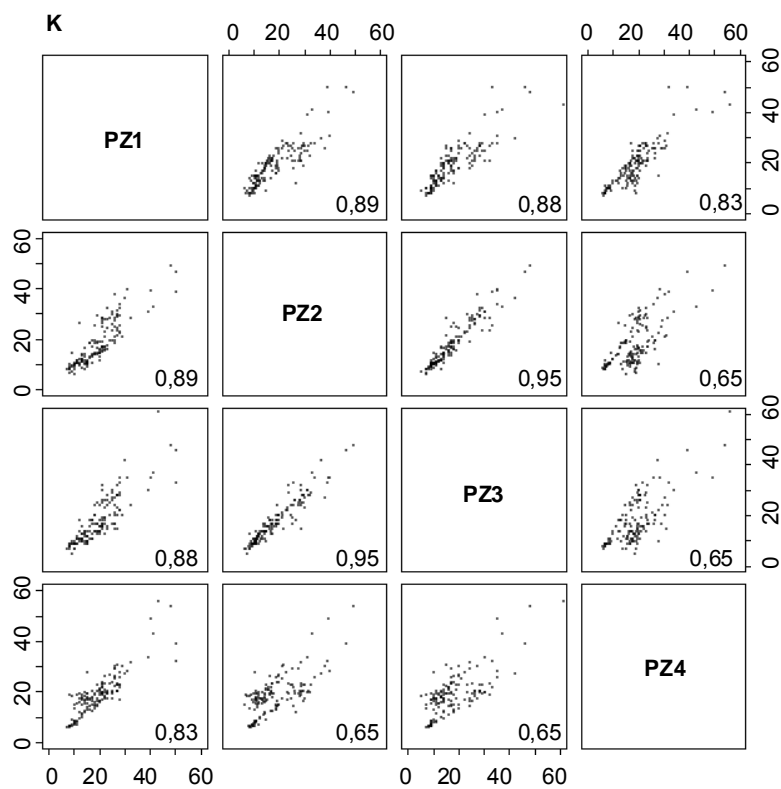
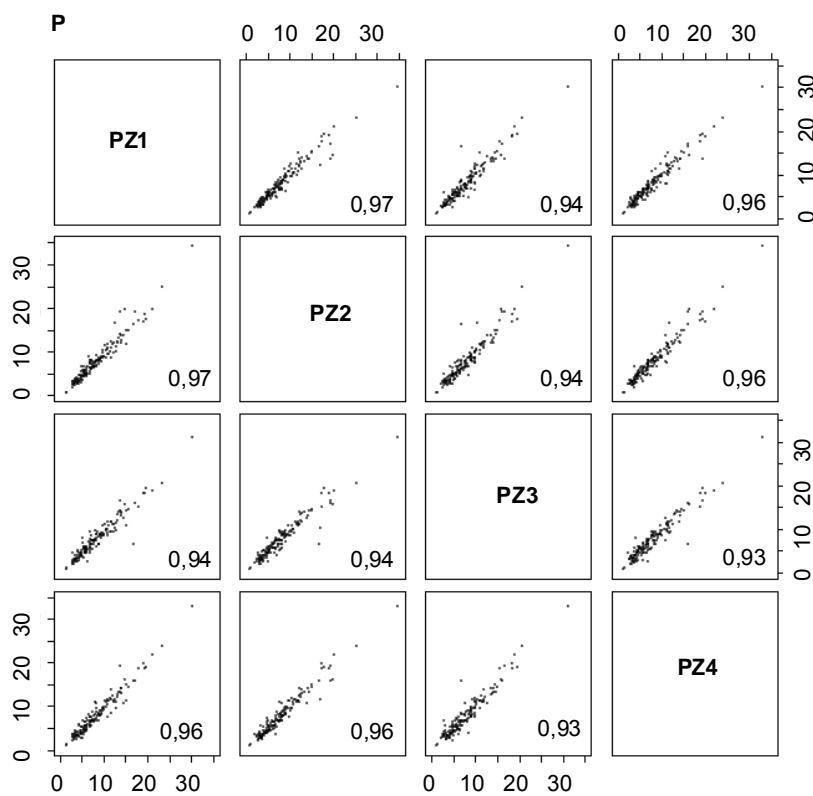
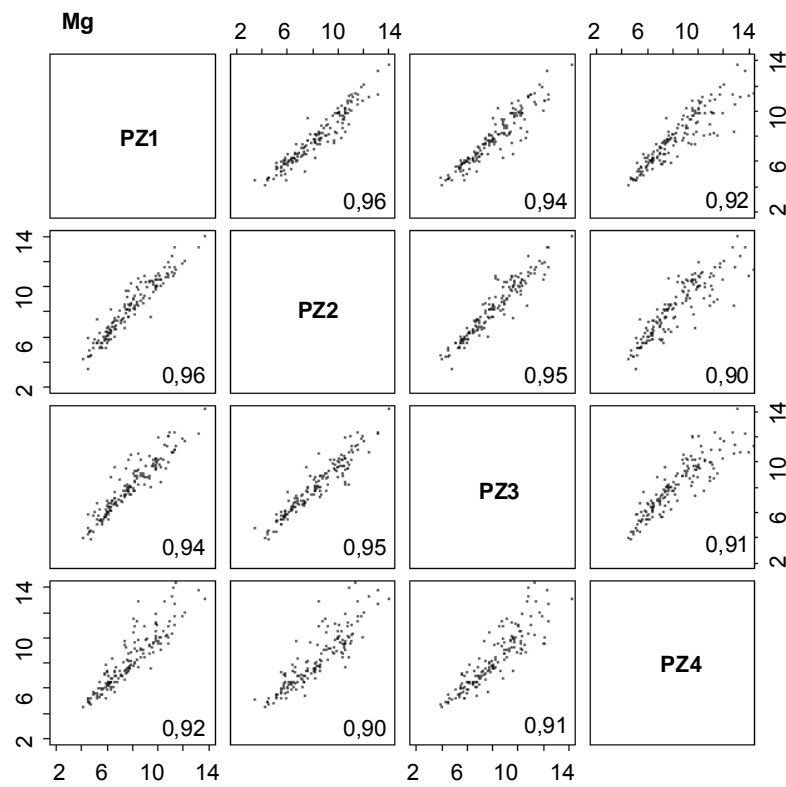
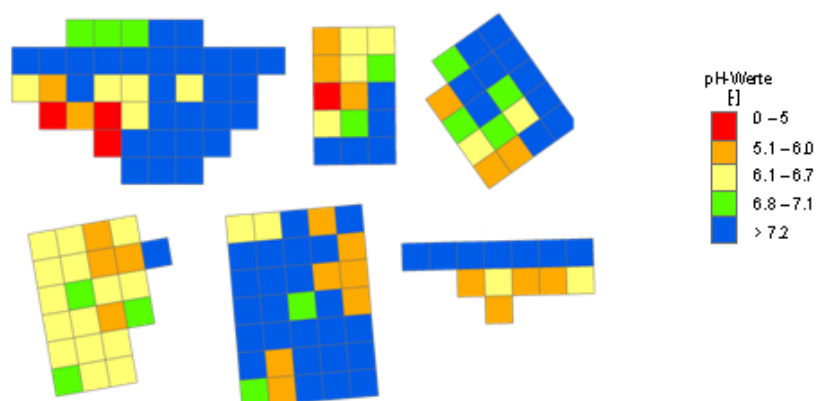


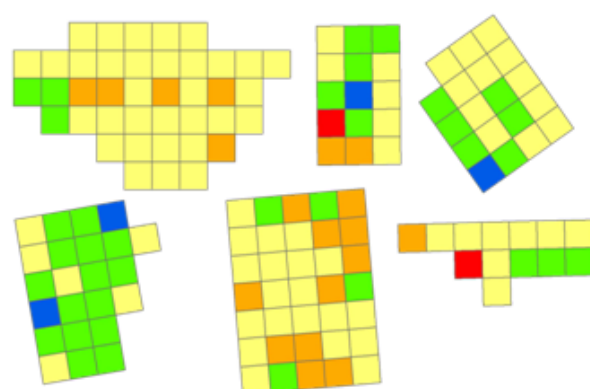
Bild 11: Fortsetzung

**Bild 11:** Fortsetzung

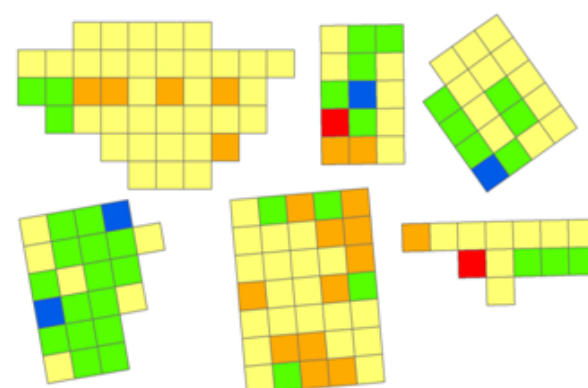
pH-Wert_f07



pH-Wert_diff_h07_f07



pH-Wert_diff_f08_f07



pH-Wert_diff_h08_f07

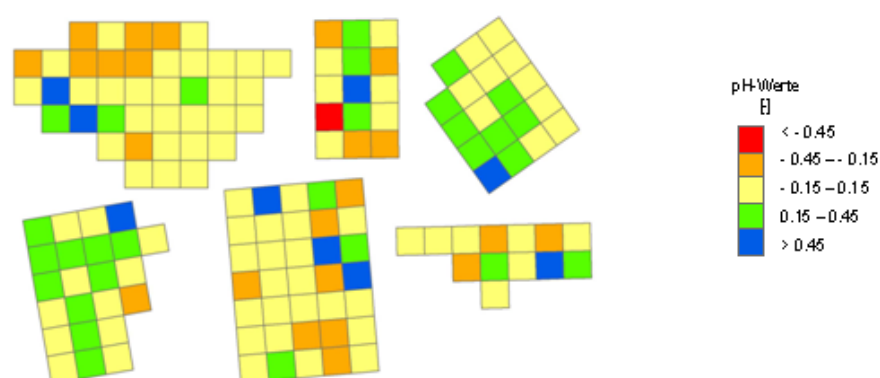


Bild 12: Räumliche Verteilung der Nährstoffgehalte zu dem Probenahmezeitpunkt PZ1 (f07) und Veränderungen der Nährstoffgehalte zu den Probenahmezeitpunkten PZ2 (h07), PZ3 (f08) und PZ4 (f08) relativ zum Probenahmezeitpunkt PZ1 auf der Schlaggruppe 1

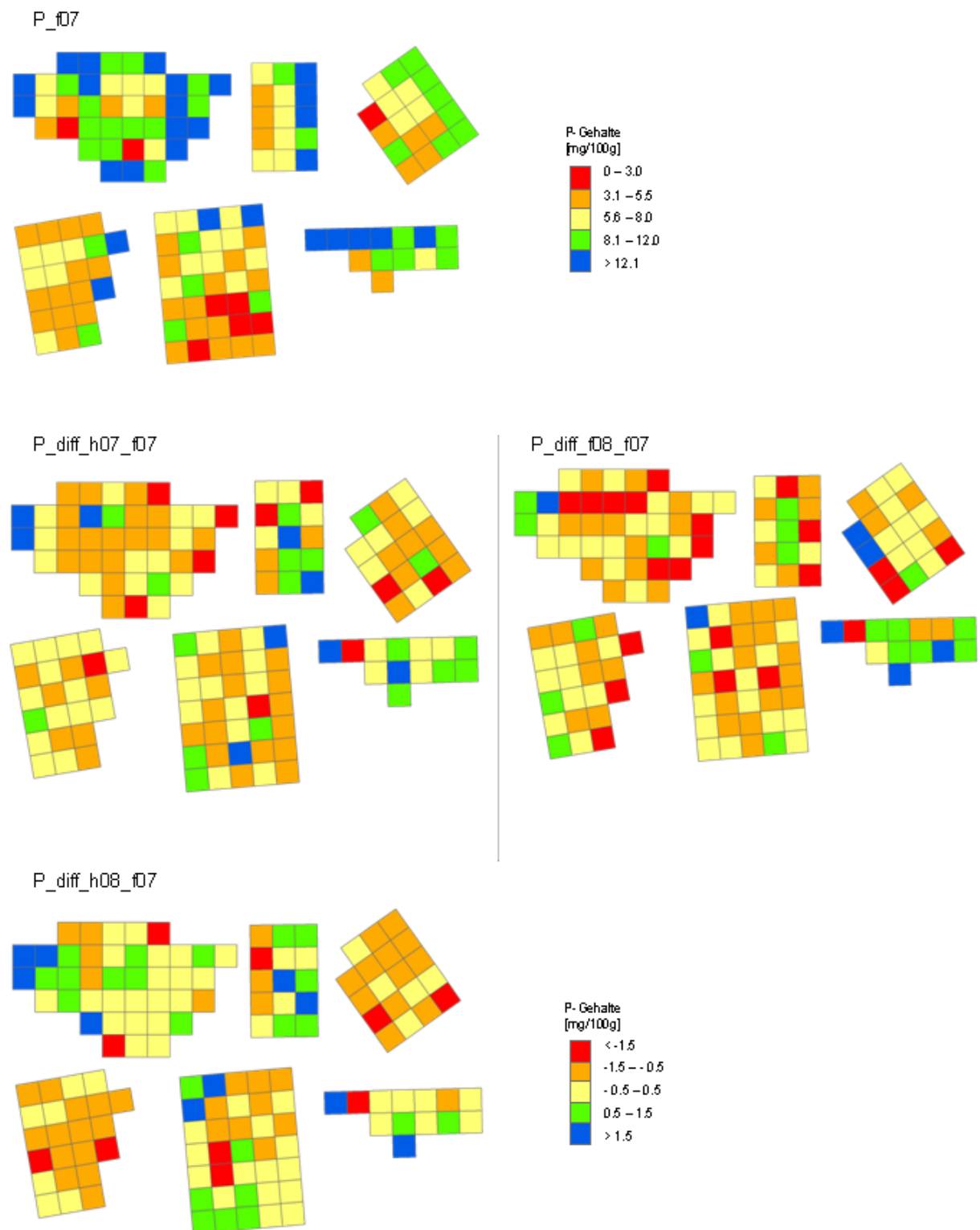
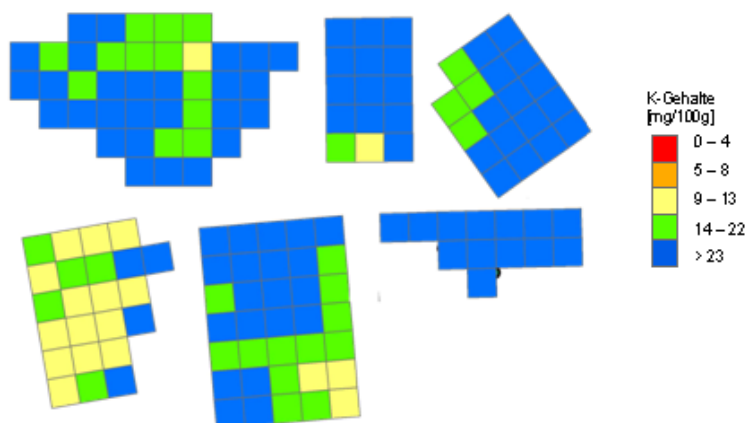
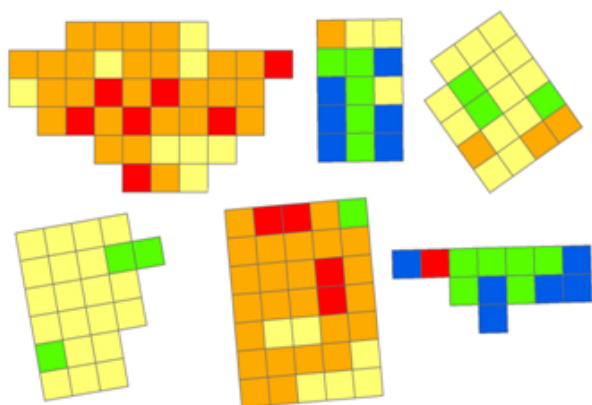


Bild 12: Fortsetzung

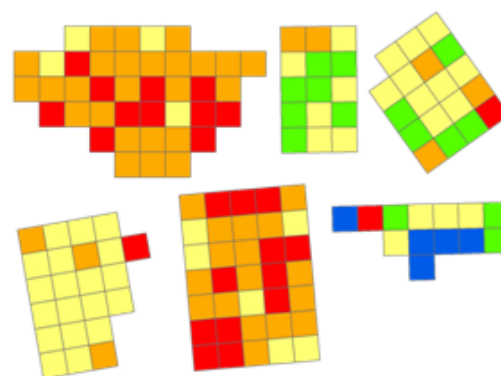
K_f07



K_diff_h07_f07



K_diff_f08_f07



K_diff_h08_f07

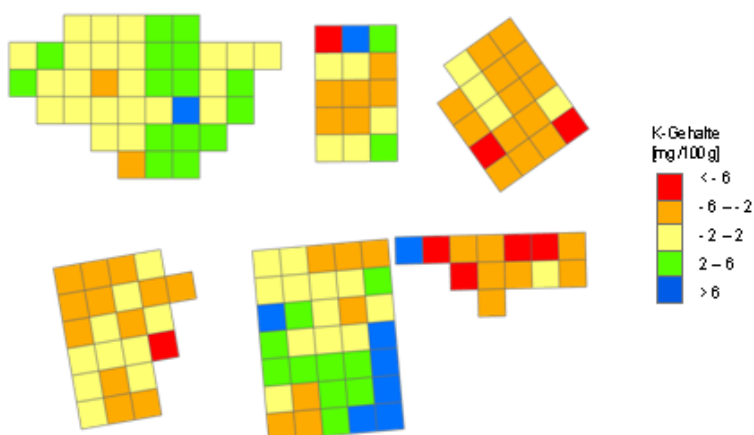
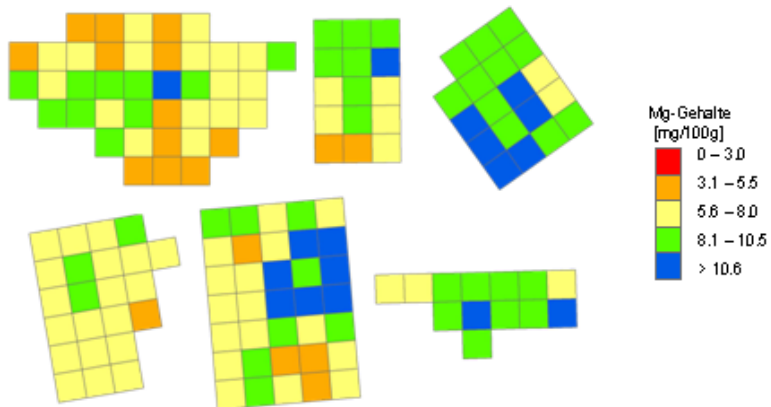
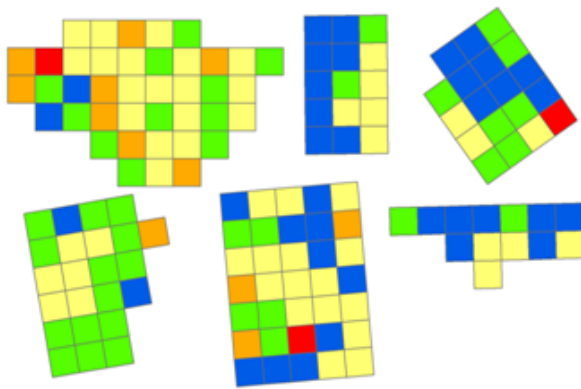


Bild 12: Fortsetzung

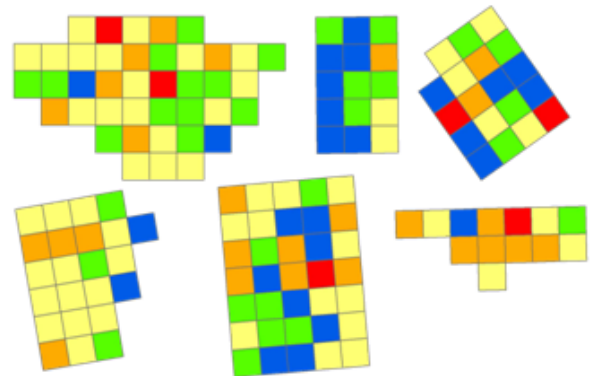
Mg_f07



Mg_diff_h07_f07



Mg_diff_f08_f07



Mg_diff_h08_f07

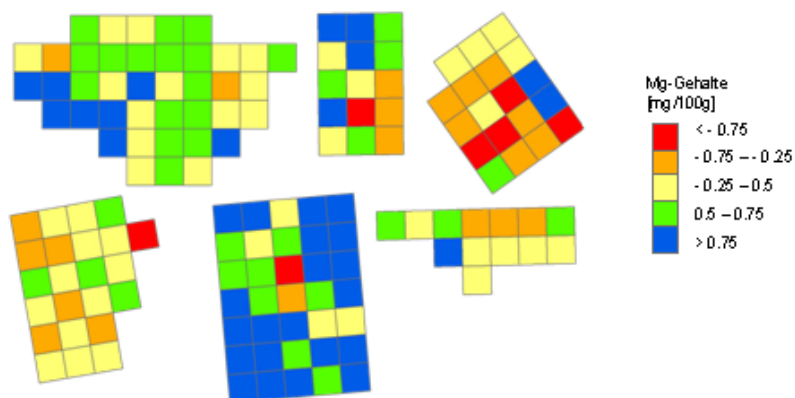


Bild 12: Fortsetzung

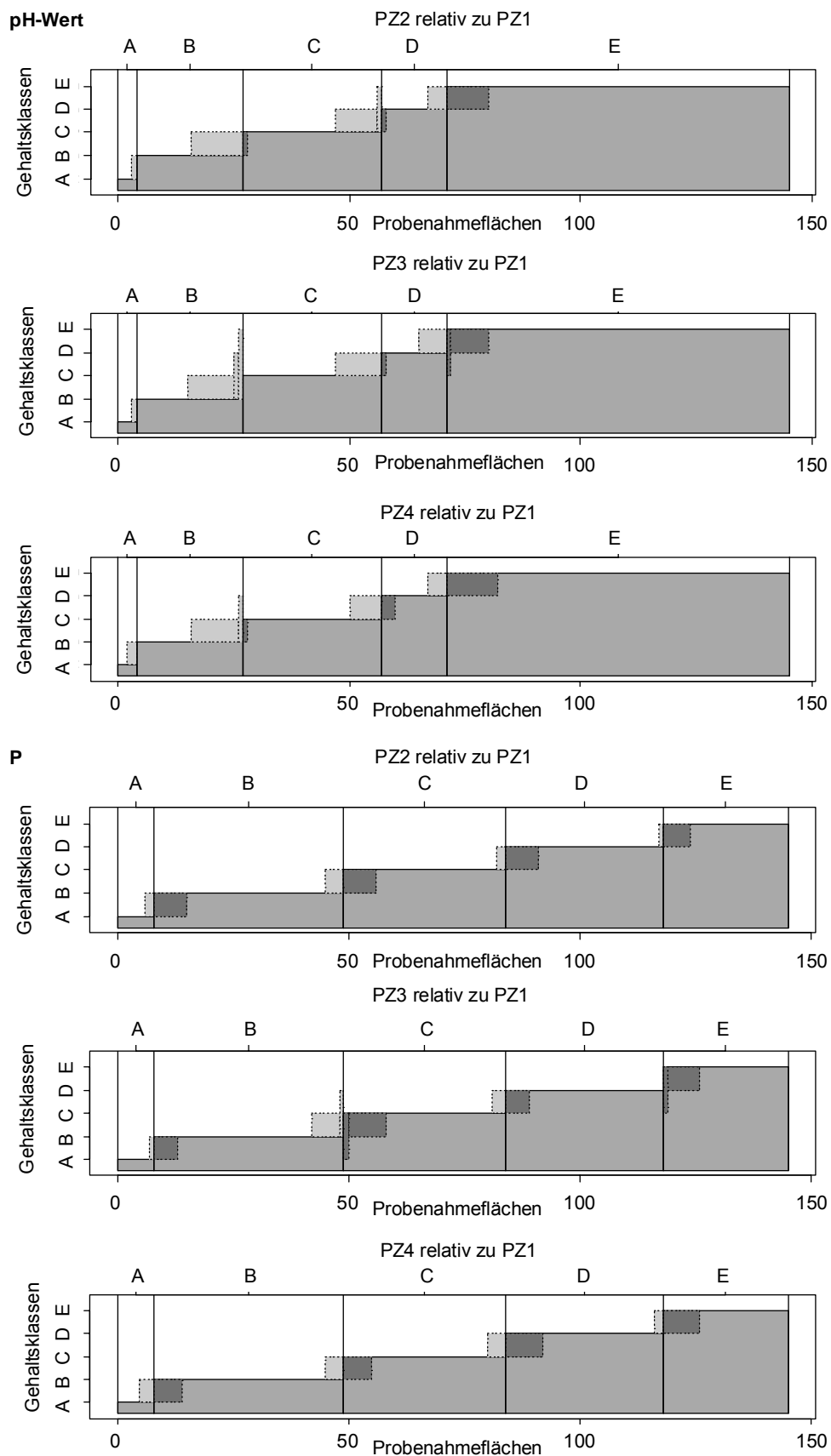


Bild 13: Einstufung der Probenahme­flächen in die Nährstoffgehaltsklassen infolge der Probe­nahme zu den Probenahmezeitpunkten PZ2, PZ3 und PZ4 im Vergleich zur Einstufung zum Probenahmezeitpunkt PZ1 auf dem Schlag Siegrennbreite

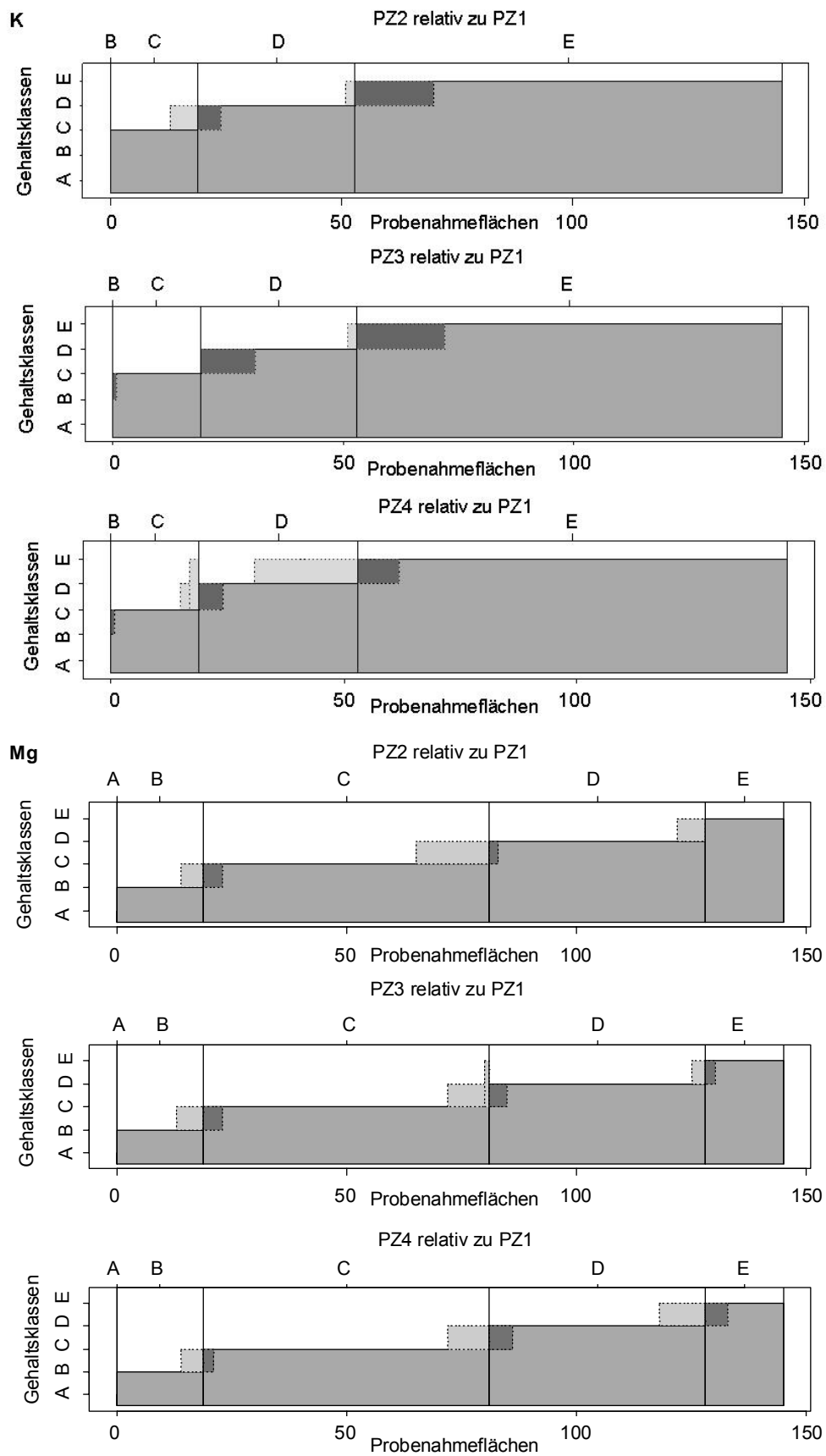


Bild 13: Fortsetzung

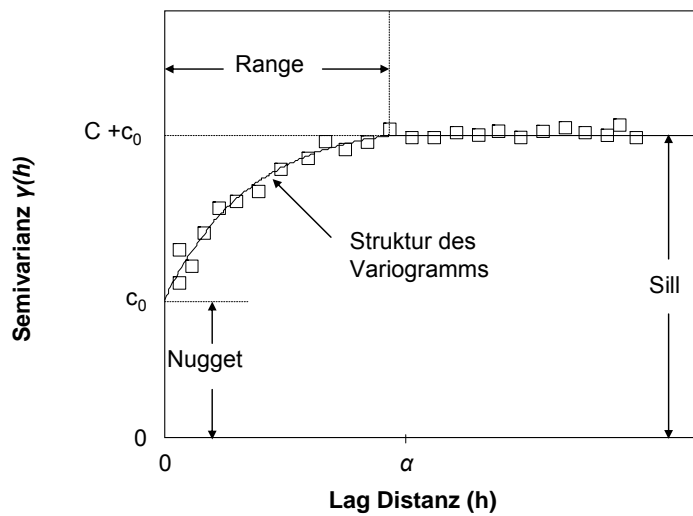


Bild 14: Allgemeine Form eines begrenzten Semivariogramms mit seinen Parametern

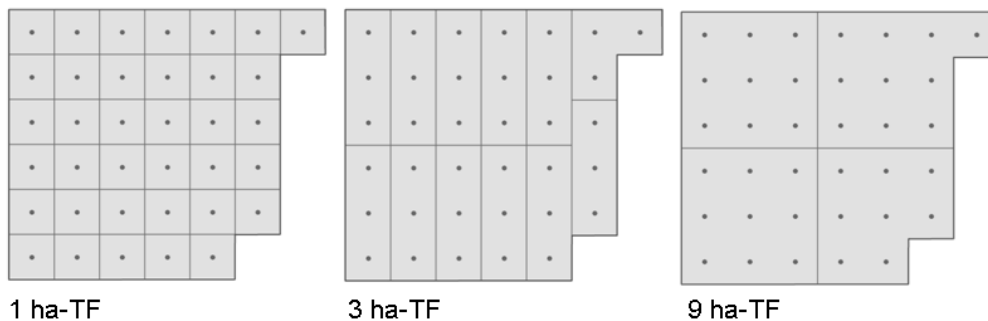
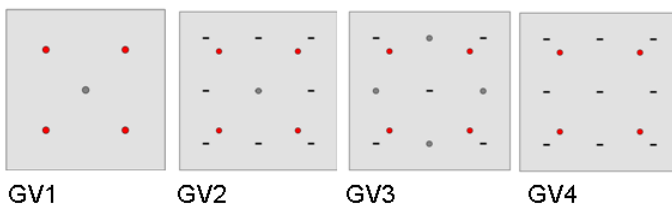


Bild 15: Untergliederung des Schlages Siegrennbreite in rasterförmige Teilflächengrößen unterschiedlicher Größe

1 ha-TF:



- zugewiesene Position
- Position mit bekanntem Nährstoffgehalt (Verifizierungspositionen)
- Position der Einstiche

Für die GV4 gibt es keine zugewiesenen Positionen, da keine Interpolation durchgeführt wird.

3 ha-TF:

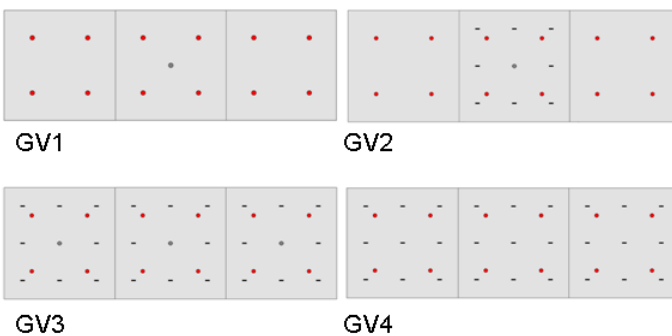


Bild 16: Varianten zur Generierung der räumlichen Verteilung der Nährstoffgehalte, dargestellt für die 1 ha- und die 3 ha-Teilflächen

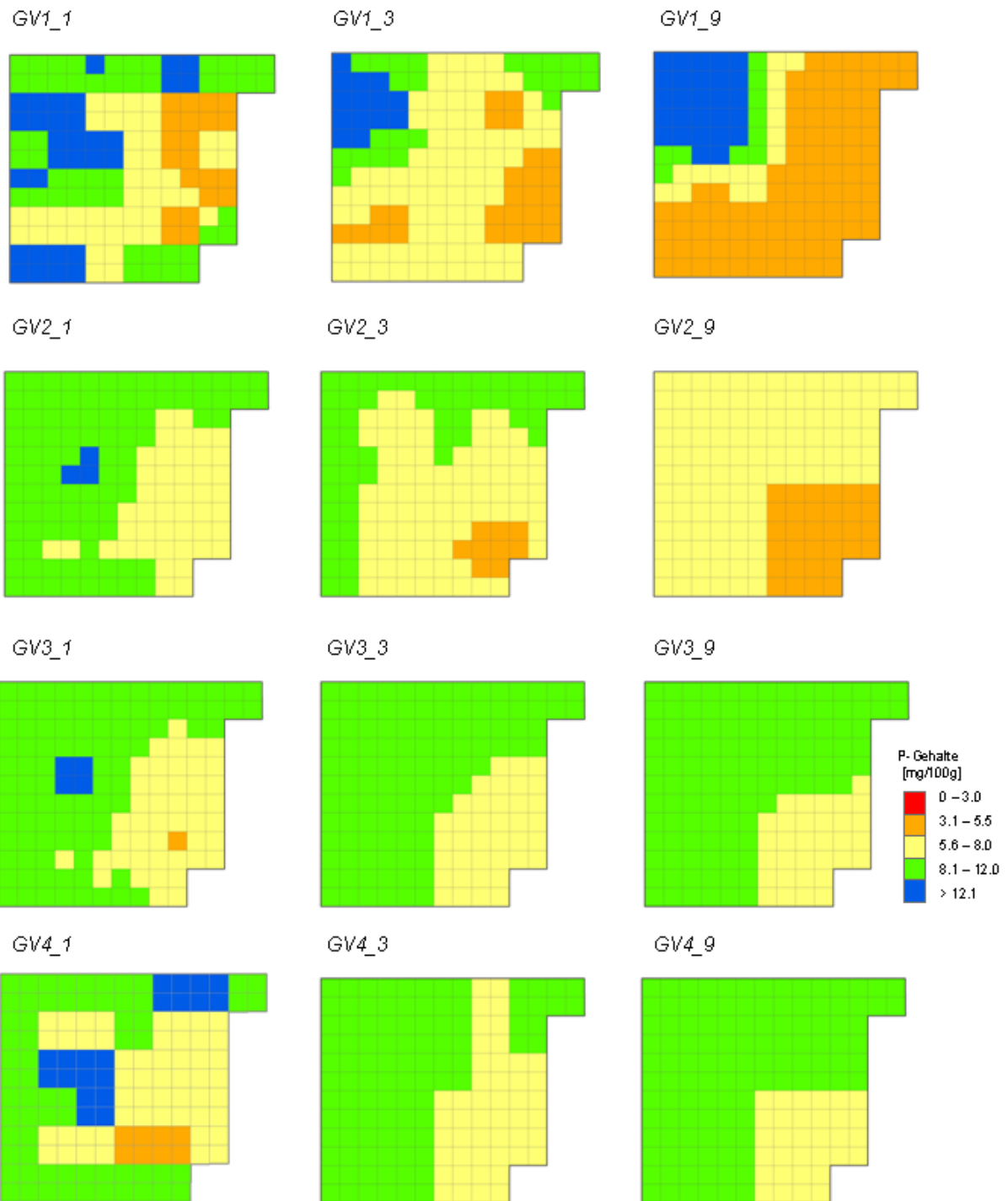
Phosphor

Bild 17: Räumliche Verteilung des Phosphorgehaltes, die durch die Generierungsvarianten GV1 bis GV4 erzeugt wird, für die Teilflächengrößen 1 ha, 3 ha und 9 ha auf dem Schlag Siegrrennbreite

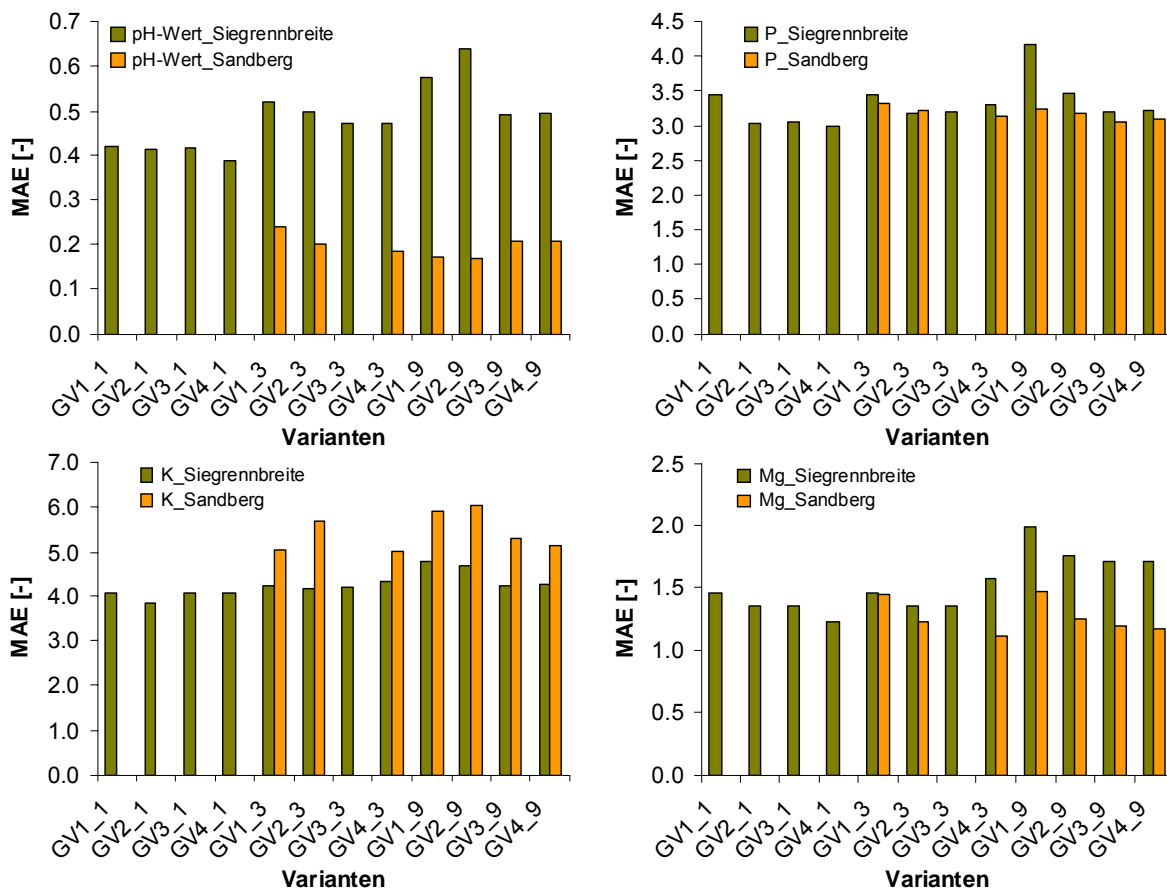


Bild 18: Absolute Fehler der Nährstoffgehalte, die durch die Generierungsvarianten GV1 bis GV4 entstehen, für die Teilflächengrößen 1 ha, 3 ha und 9 ha auf dem Schlag Siegrennbreite und für die Teilflächengrößen 3 ha und 9 ha auf dem Schlag Sandberg

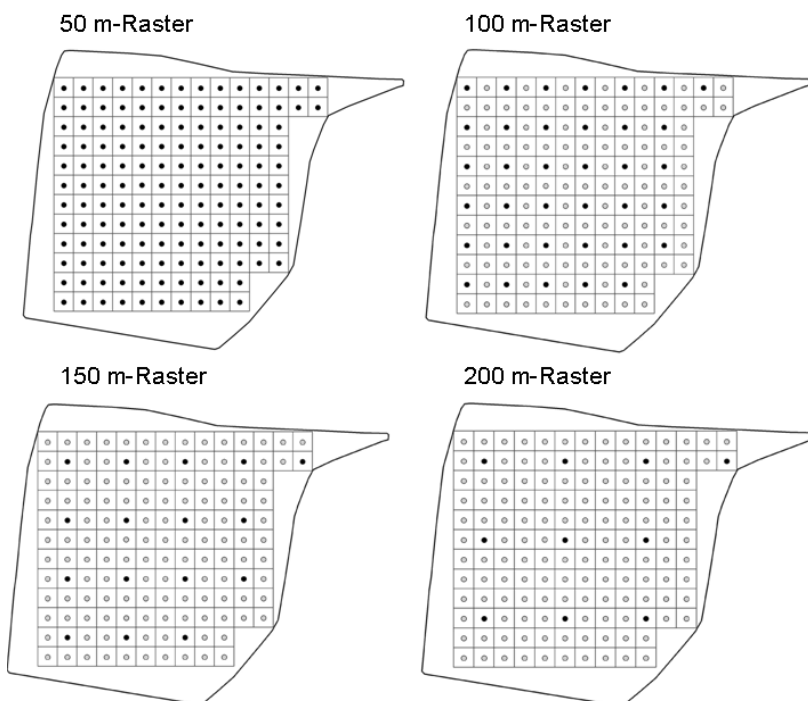


Bild 19: Simulieren mittlräumiger Probenahmen aus einer kleinräumigen Probenahme

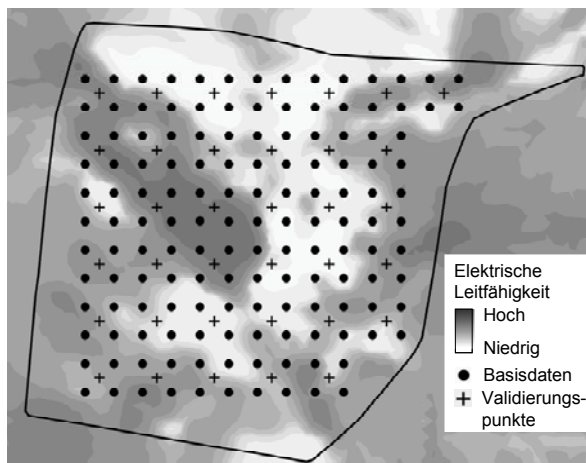


Bild 20: Lage der Validierungspunkte relativ zu den Punkten der Probenahme im 50 m-Raster

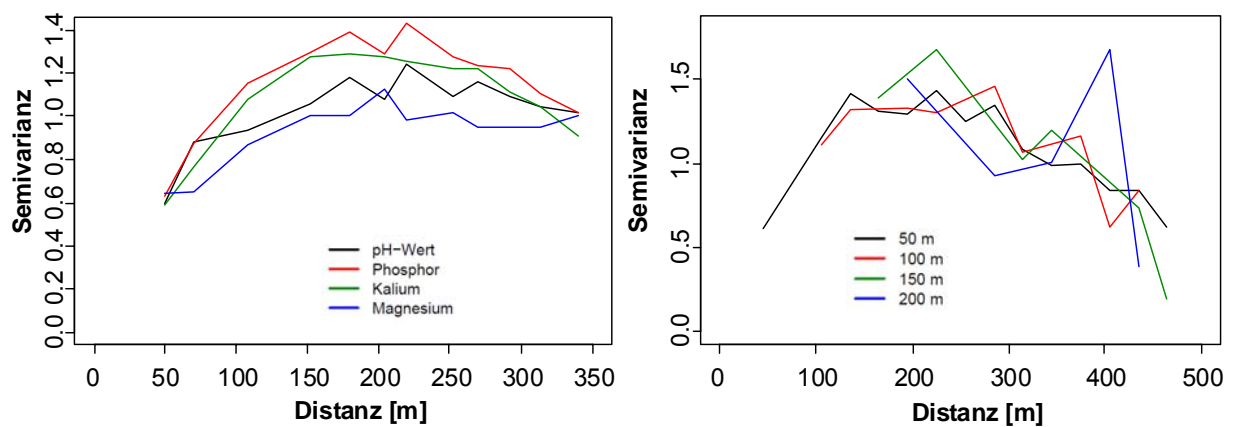


Bild 21: Standardisierte empirische Semivarianzkurven für die Nährstoffgehalte bei einem Probenahmeraster von 50 m (linkes Bild) sowie für den Phosphorgehalt bei unterschiedlichen Probenahmerastern (rechtes Bild)

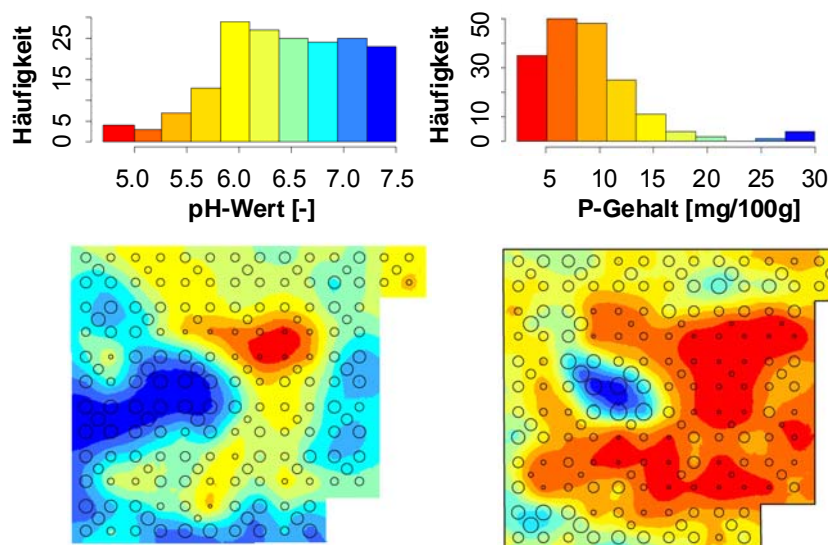


Bild 22: Räumliche Verteilungen der Nährstoffgehalte auf der Basis der Probenahme im 50 m-Raster

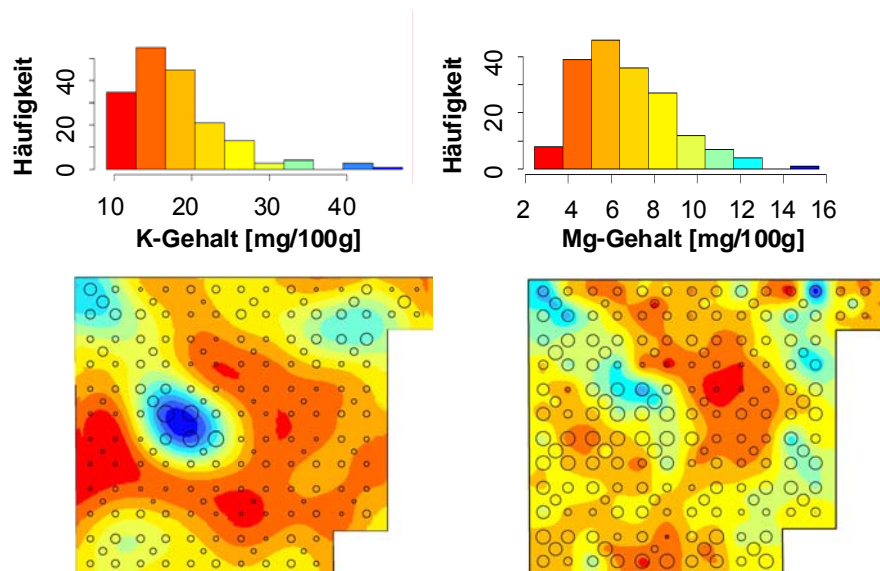


Bild 22: Fortsetzung

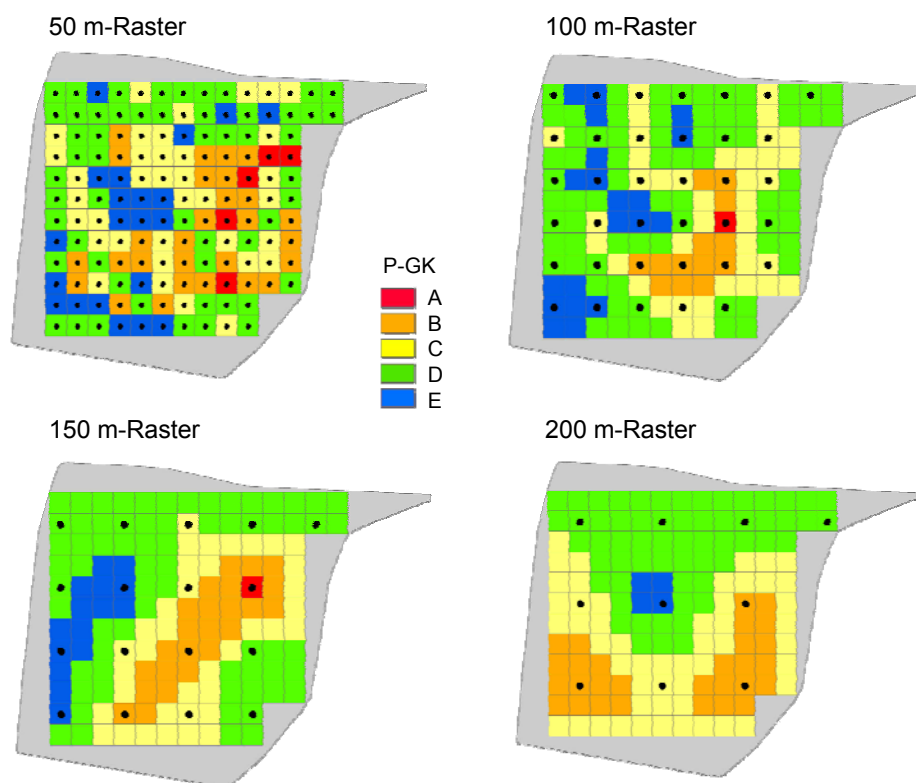


Bild 23: Räumliche Verteilung der Phosphorgehaltsklassen in Abhängigkeit von dem Probenahmeraster

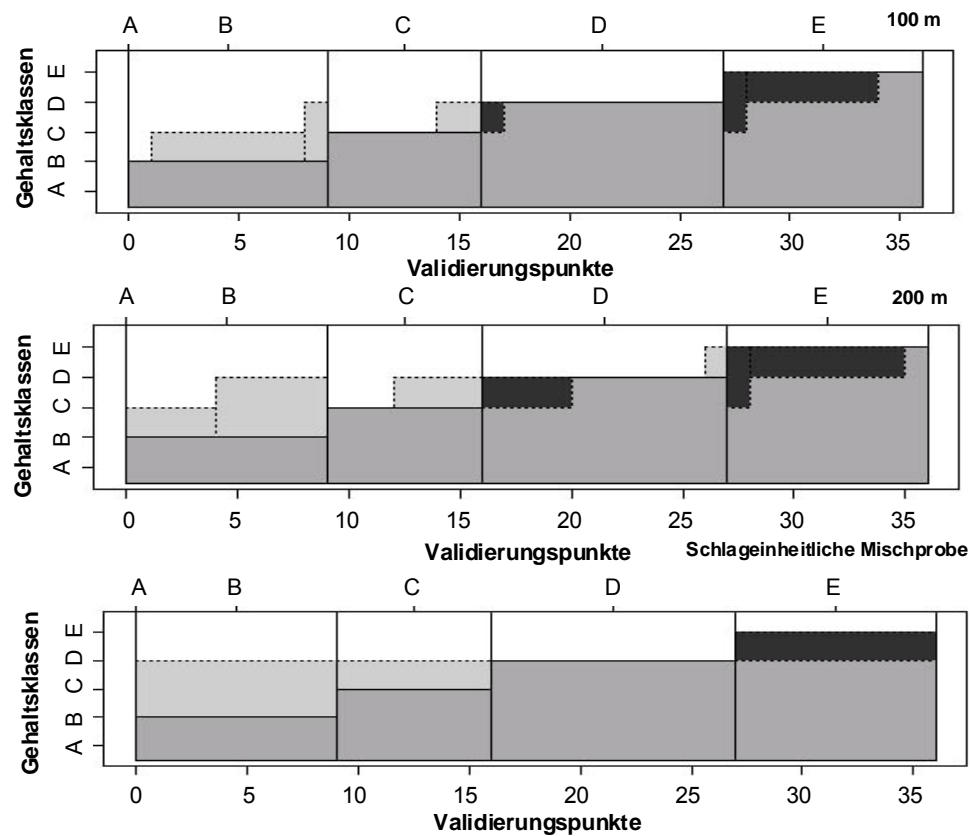


Bild 24: Veränderung der interpolierten Phosphorgehaltsklassen des 50 m-Rasters an den Validierungspunkten durch die interpolierten Phosphorgehaltsklassen des 100 m- und 200 m-Rasters sowie durch eine mittlere, schlageinheitliche Phosphorgehaltsklasse

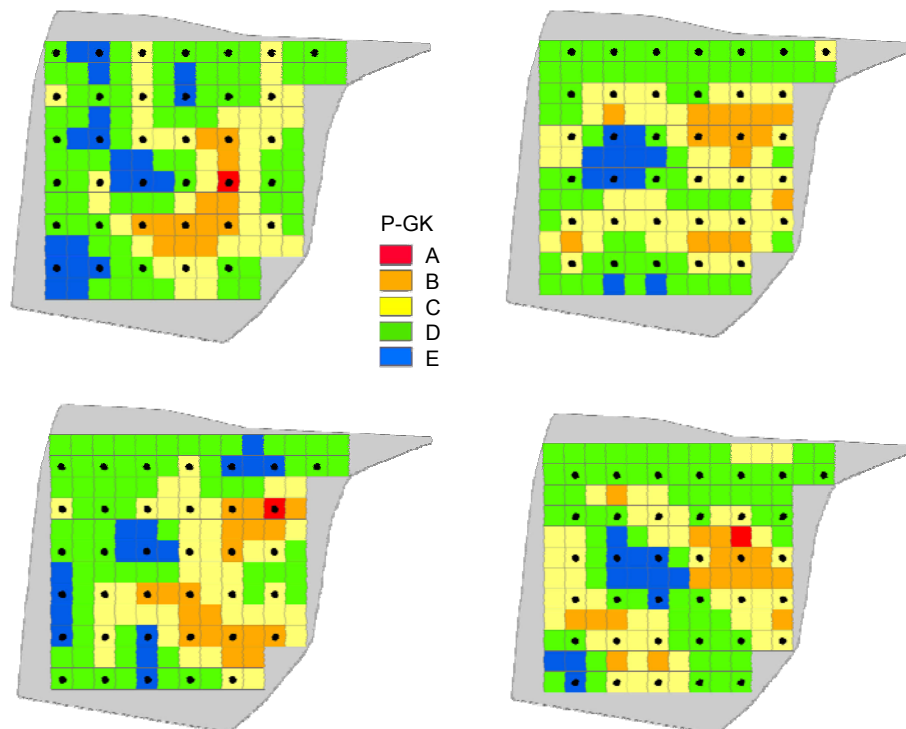


Bild 25: Räumliche Verteilungen der Phosphorgehaltsklassen auf der Grundlage einer Probe-nahme im 100 m-Raster in Abhängigkeit von vier Anordnungen des Probenahmerasters bzw. von vier Rasterstartpunkten auf dem Schlag Siegrengbreite

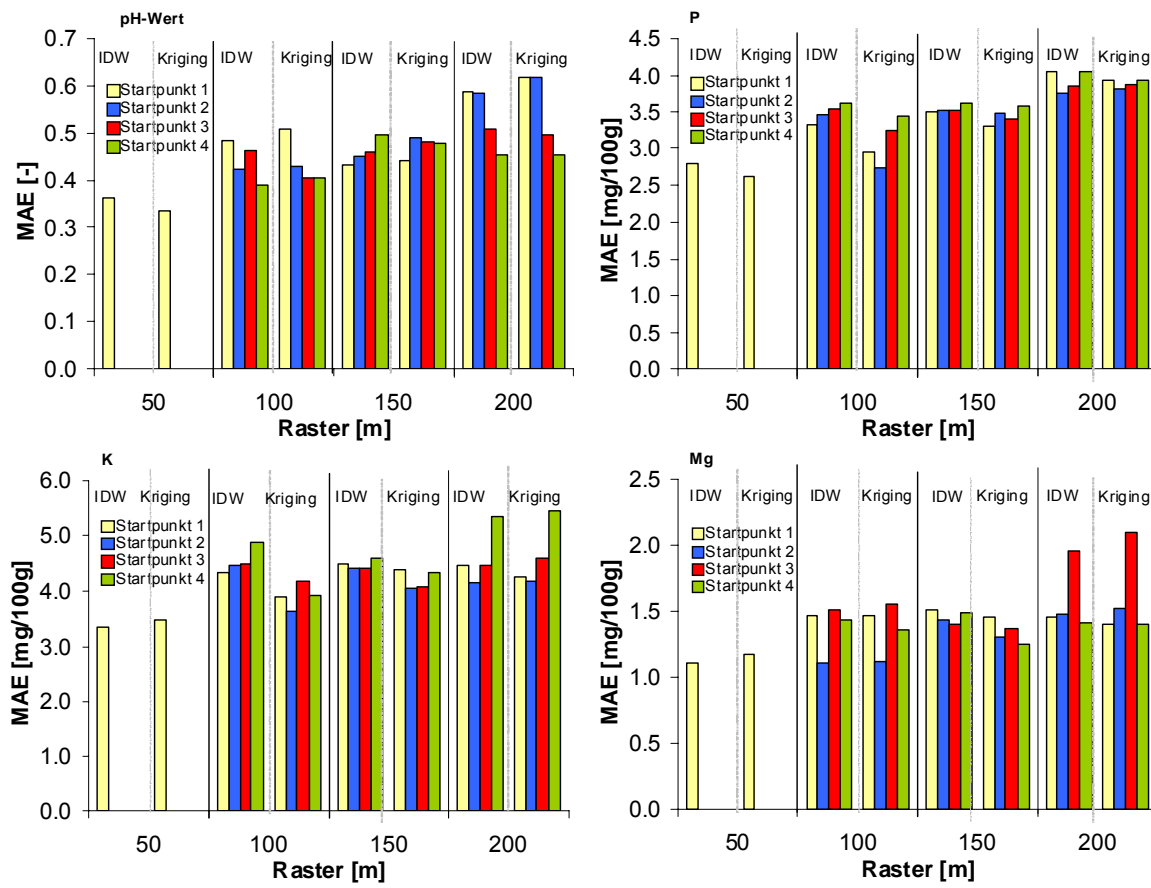


Bild 26: Mittlerer absoluter Fehler der IDW- und Kriging-Interpolation auf der Grundlage verschiedener Probenahmeraster und Rasterstartpunkte

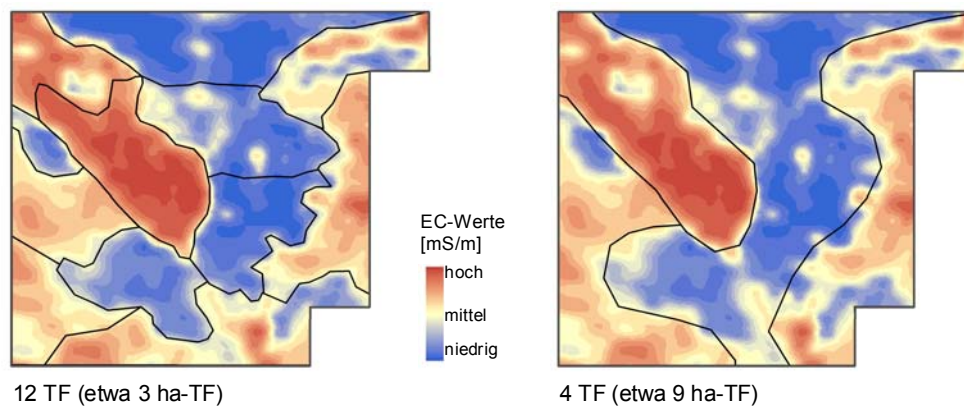


Bild 27: Untergliederung des Schlags Siegreimbrenne in unterschiedliche Klassenflächen der elektrischen Bodenleitfähigkeit (EC)

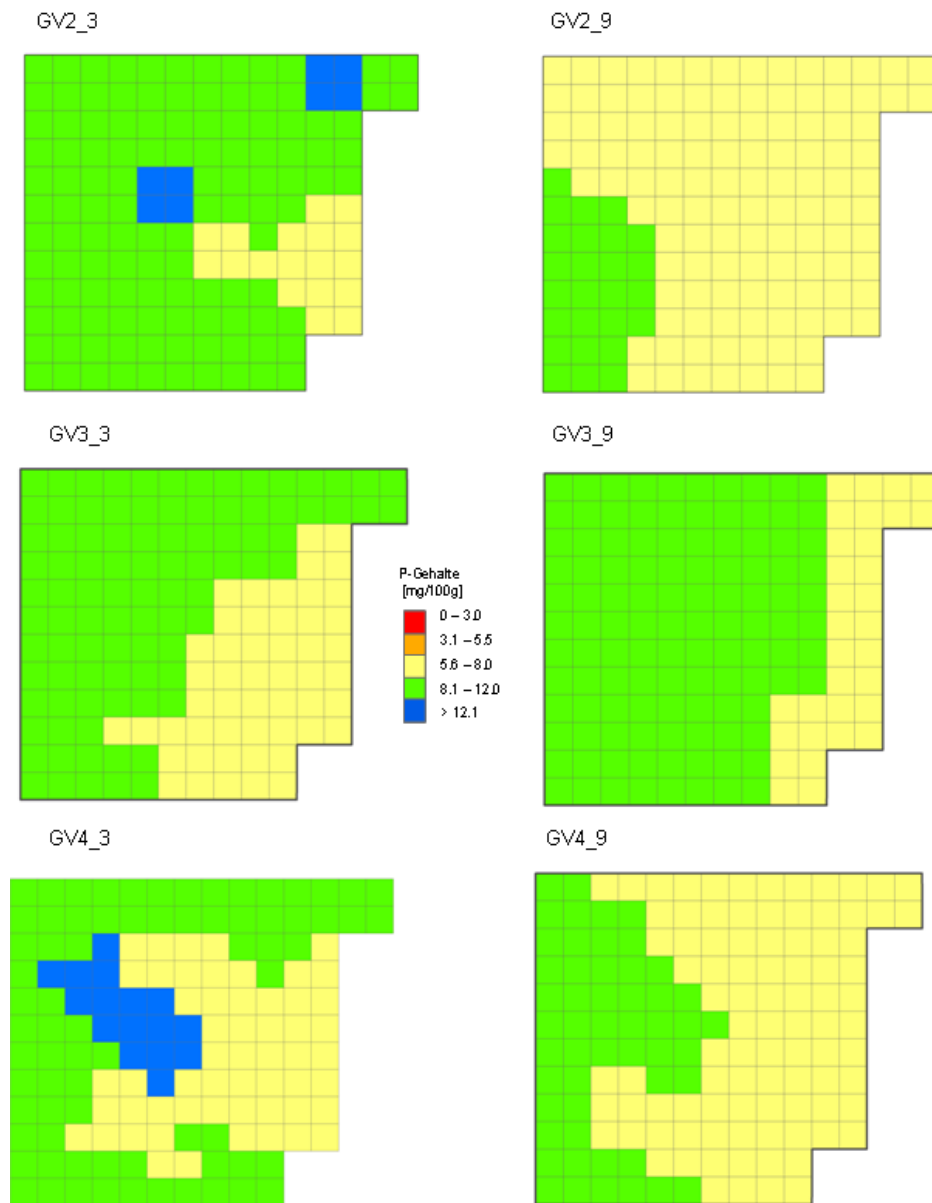


Bild 28: Räumliche Verteilungen der Phosphorgehalte, die durch die Generierungsvarianten GV2 bis GV4 erzeugt werden, auf der Grundlage einer gezielten Probenahme für die Teilflächengrößen 3 ha und 9 ha auf dem Schlag Siegreimbrenne

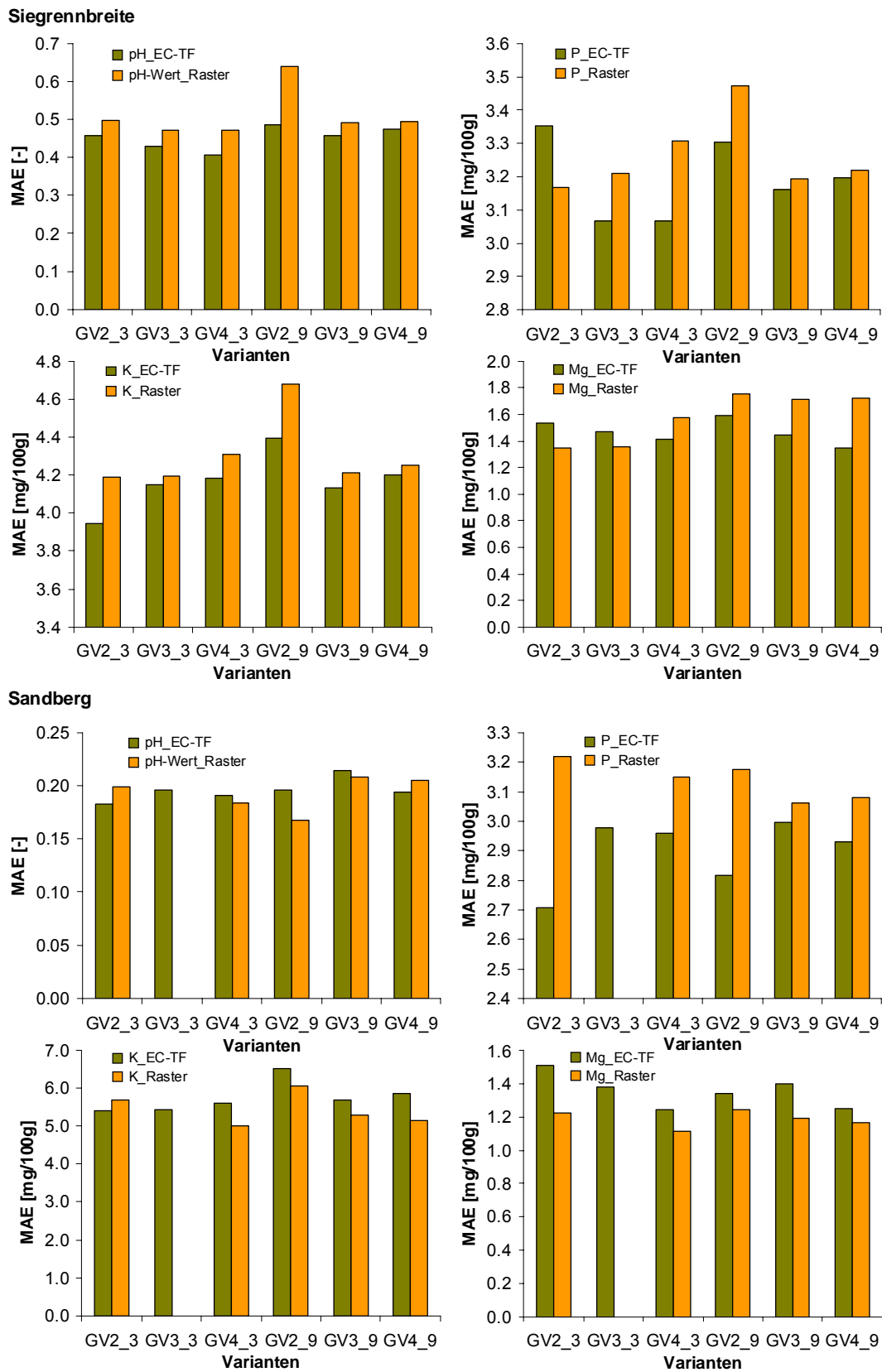


Bild 29: Direkter Vergleich der absoluten Fehler der Nährstoffgehalte auf der Basis einer Klassenflächen- bzw. Rasterbeprobung, die durch die Generierungsvarianten GV2 bis GV4 entstehen, für die Teilflächengrößen 3 ha und 9 ha auf den Schlägen Siegrrennbreite und Sandberg

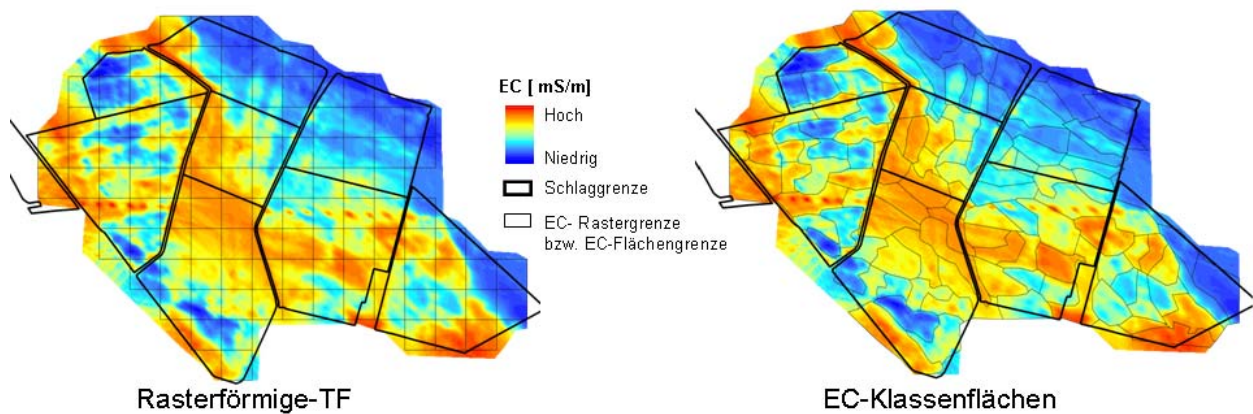


Bild 30: Unterteilung der Schlaggruppe 2 in gleichmäßige Rasterflächen und in auf der elektrischen Bodenleitfähigkeit basierende Klassenflächen

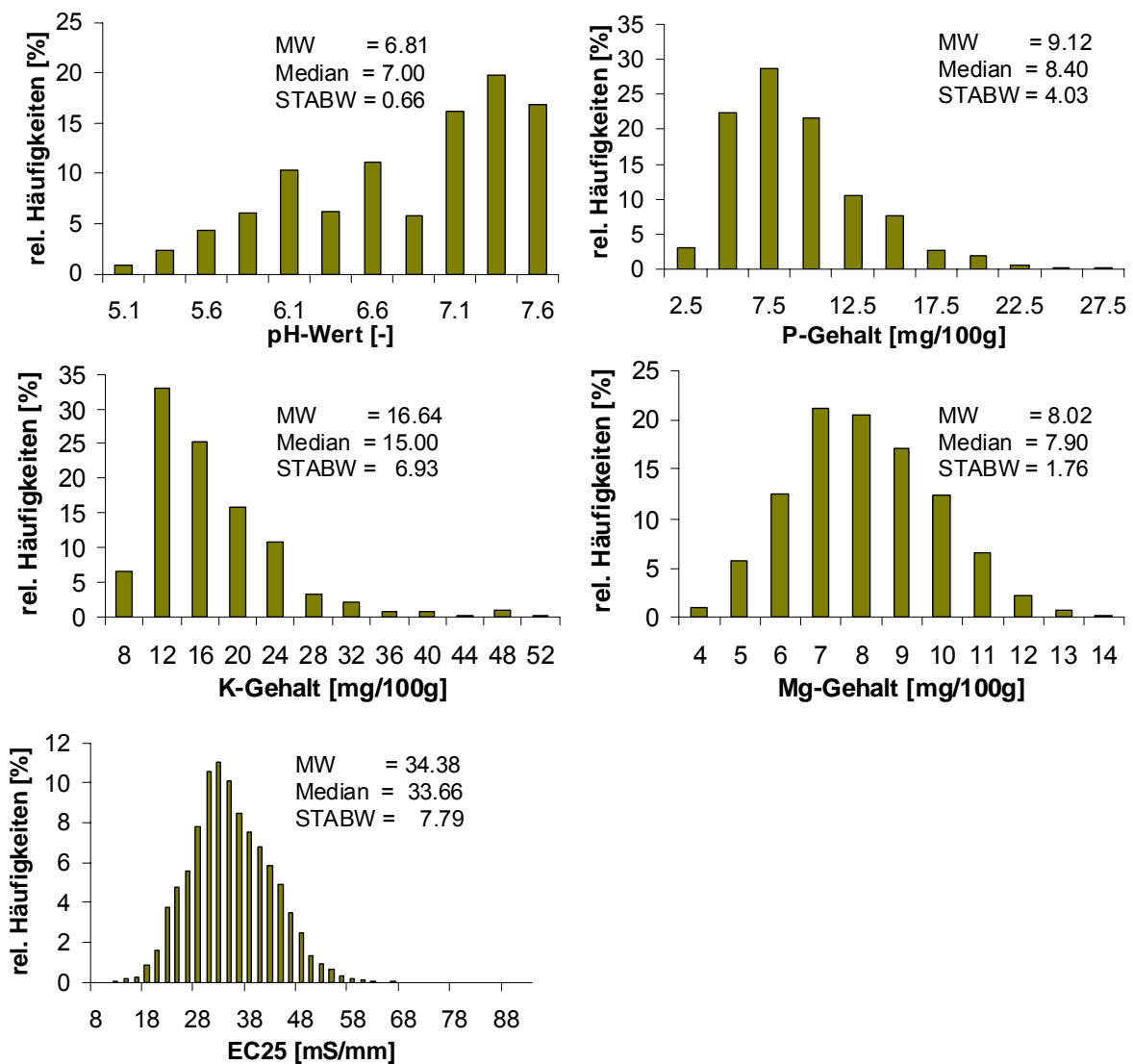


Bild 31: Häufigkeitsverteilungen der Nährstoffgehalte sowie der elektrischen Bodenleitfähigkeit auf der Schlaggruppe 2

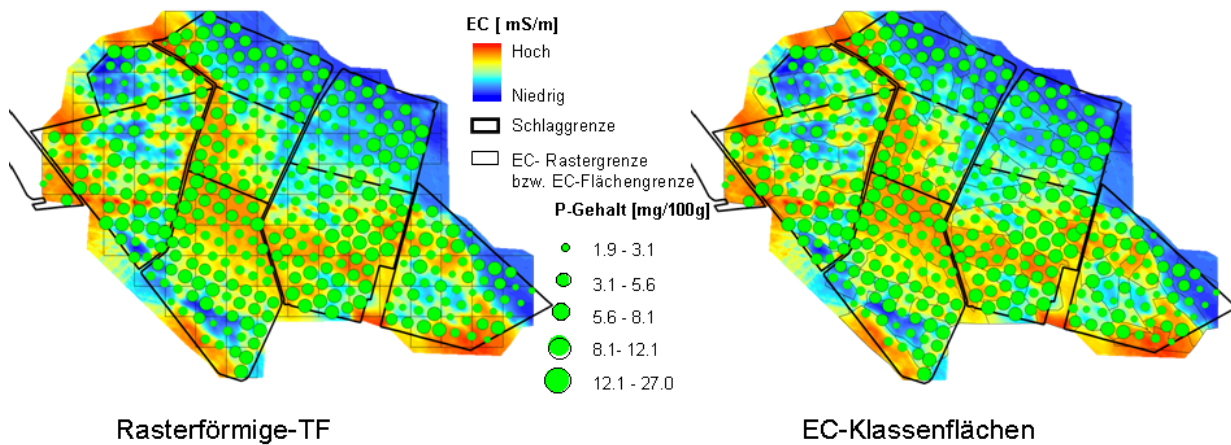


Bild 32: Die Phosphorgehalte im Verhältnis zu den Schlaggrenzen und zu den Raster- bzw. Klassenflächen

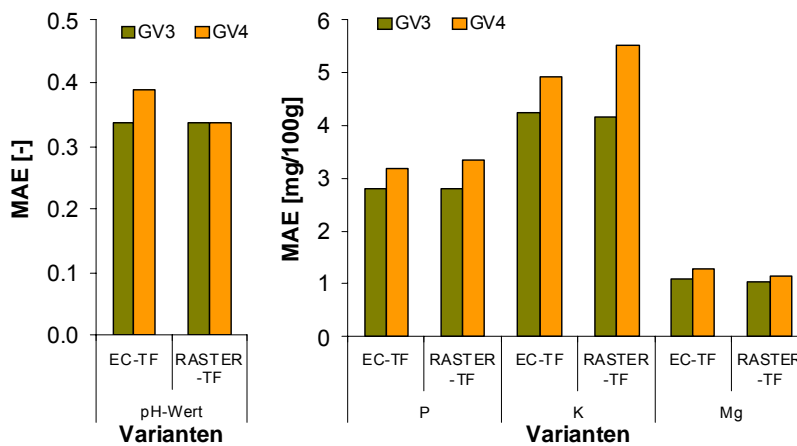


Bild 33: Absolute Fehler der Nährstoffgehalte, die durch die Generierungsvarianten GV3 und GV4 entstehen, für gleichgroße Klassen- (EC-TF) und Rasterflächen auf der Schlaggruppe 2

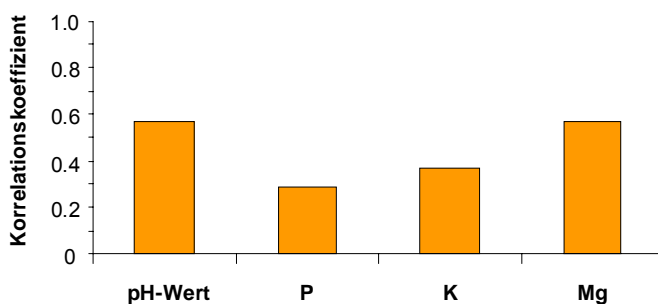


Bild 34: Korrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen der elektrischen Bodenleitfähigkeit und den Nährstoffgehalten auf dem Schlag Siegreimbrennbreite (Daten 2007)

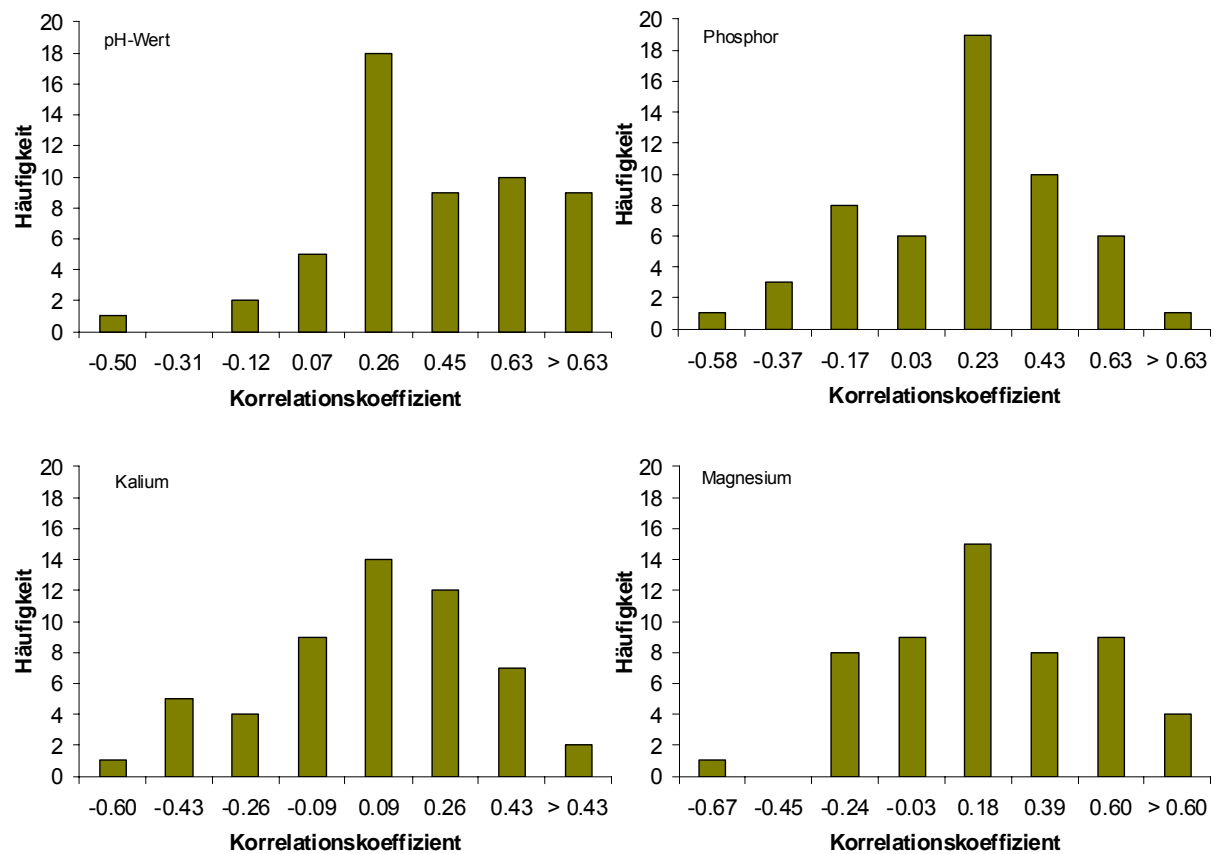


Bild 35: Häufigkeitsverteilung der Korrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen der elektrischen Bodenleitfähigkeit und den Nährstoffgehalten auf Schlägen der Dawa

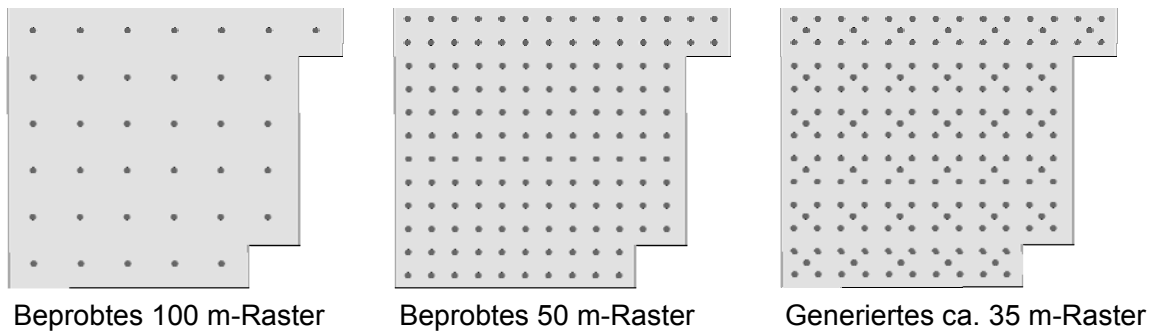


Bild 36: Untersuchte Rastergrößen für die Interpolation mit Kovariablen

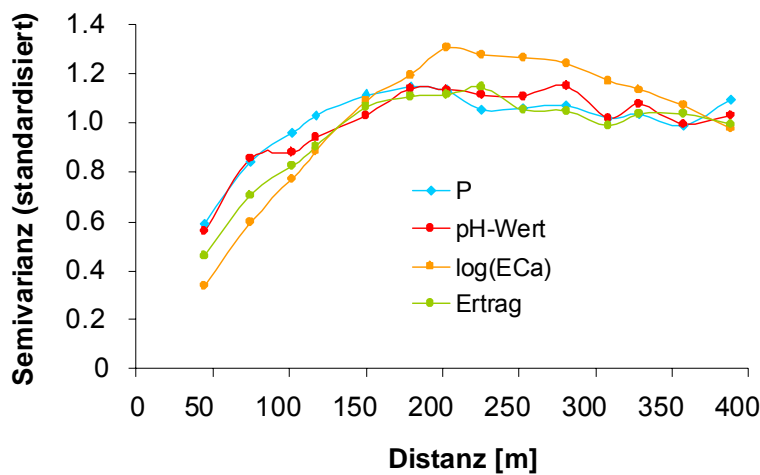


Bild 37: Standardisierte Semivariogramme für Phosphor und die Kovariablen auf der Basis des 35 m-Rasters

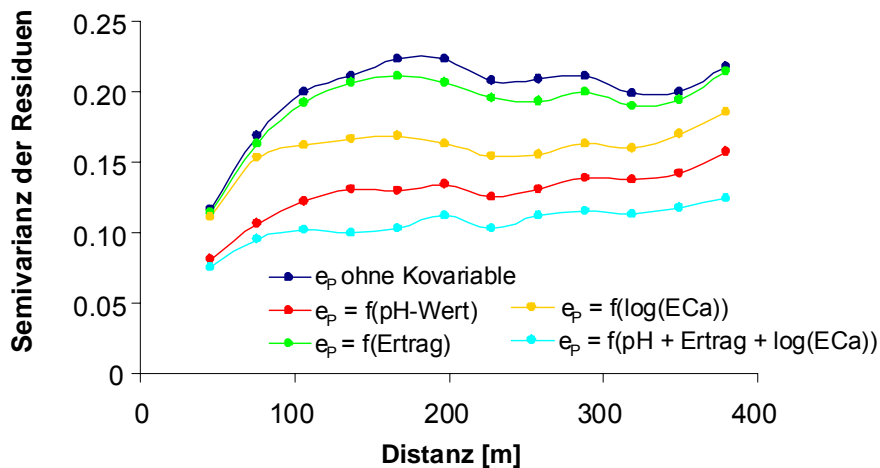


Bild 38: Semivariogramme der Residuen der linearen Regressionsmodelle ohne und mit Kovariablen

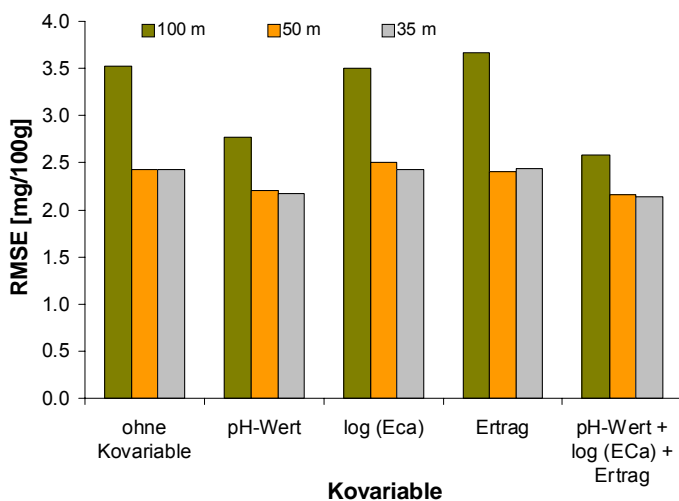


Bild 39: Fehler (RMSE) der Kreuzvalidierung bei räumlicher Modellierung mit dem 35 m, 50 m und 100 m Datensatz

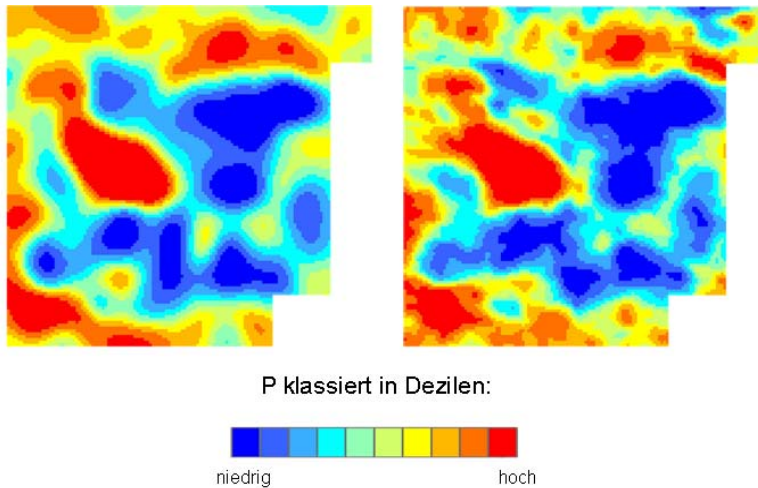


Bild 40: Räumliche Verteilungen der Phosphorgehalte infolge Kriging ohne Kovariable (linkes Bild) und Kriging mit external drift unter Nutzung aller Kovariablen (rechtes Bild)

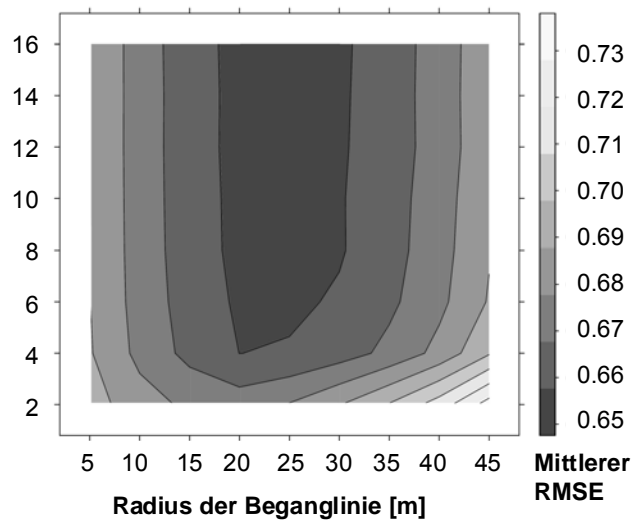


Bild 41: Mittlerer Fehler (RMSE) der Simulation nach 500 Iterationen in Abhängigkeit von der Anzahl der Einstiche und dem Radius der kreisförmigen Beganglinie

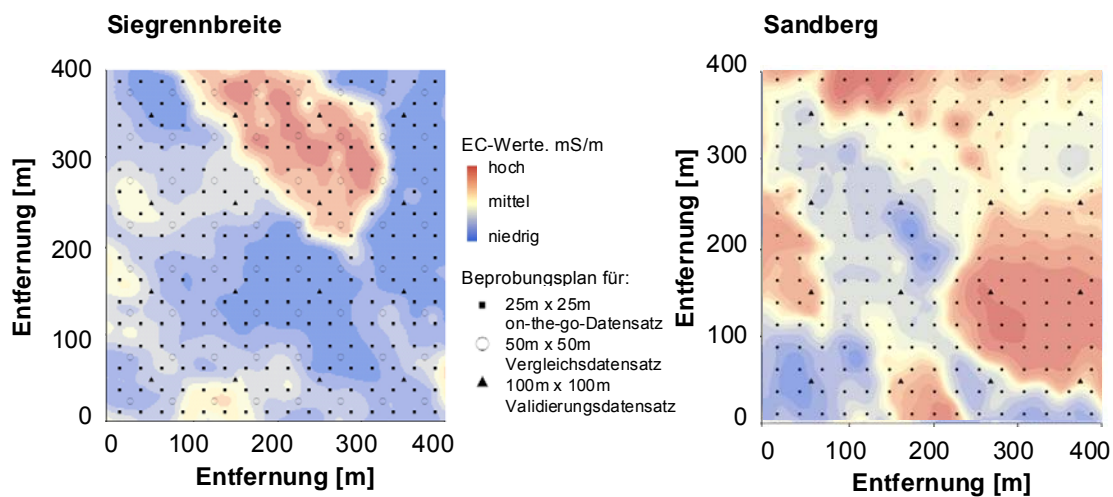
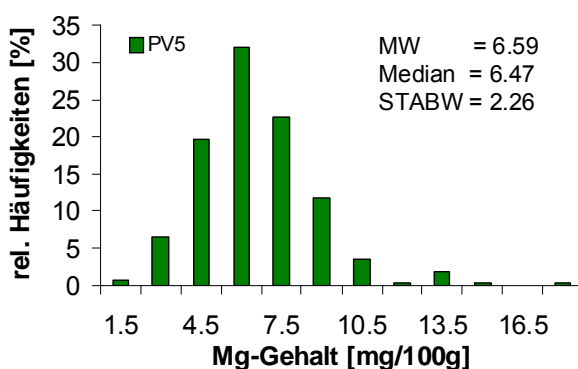
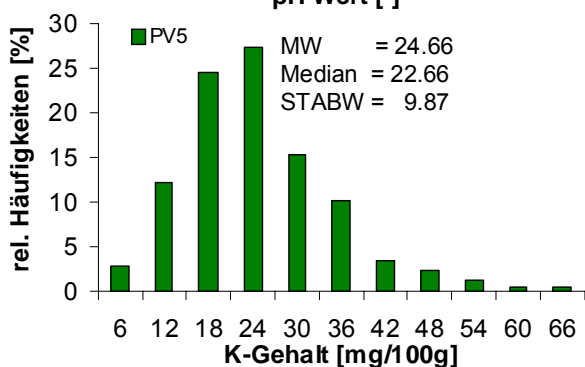
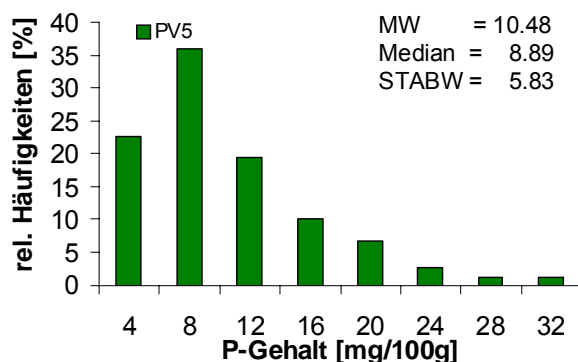
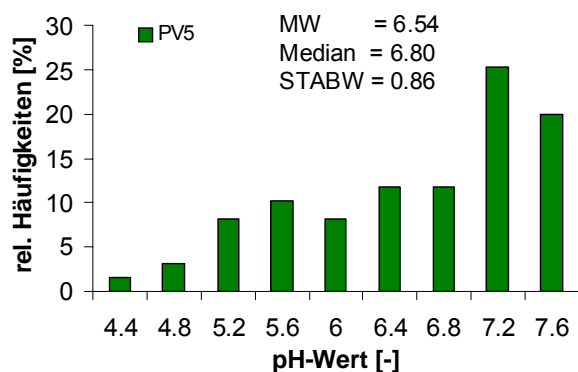


Bild 42: Teilschläge der Schläge Siegrebnbreite und Sandberg mit der Verteilung der elektrischen Bodenleitfähigkeit (EC)

Siegrennbreite



Sandberg

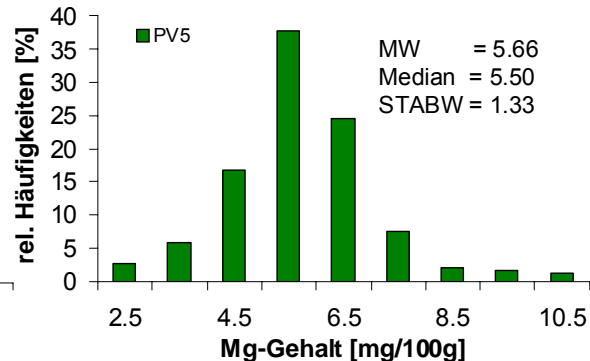
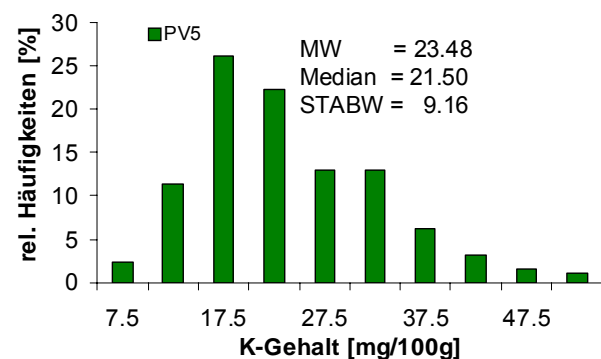
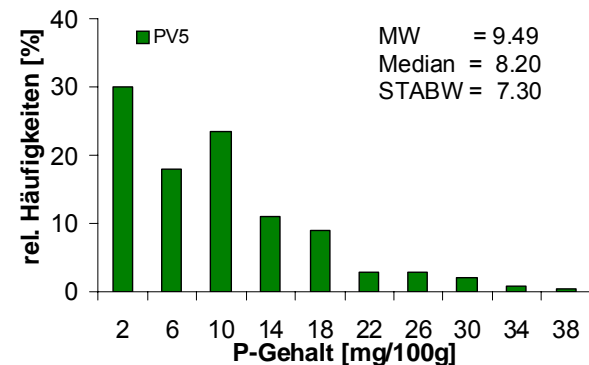
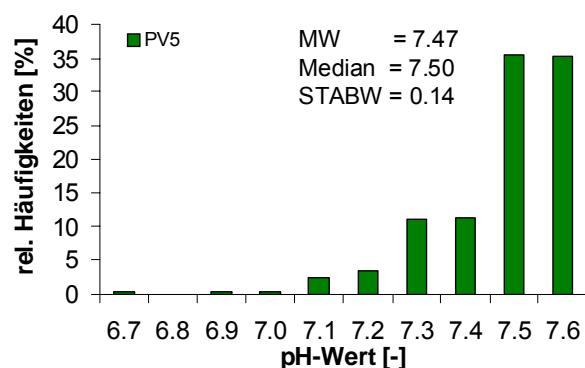


Bild 43: Häufigkeitsverteilungen der Nährstoffgehalte auf den 16 ha-Teilflächen der Schläge Siegrennbreite und Sandberg auf der Basis der Probenahme im 50 m-Raster

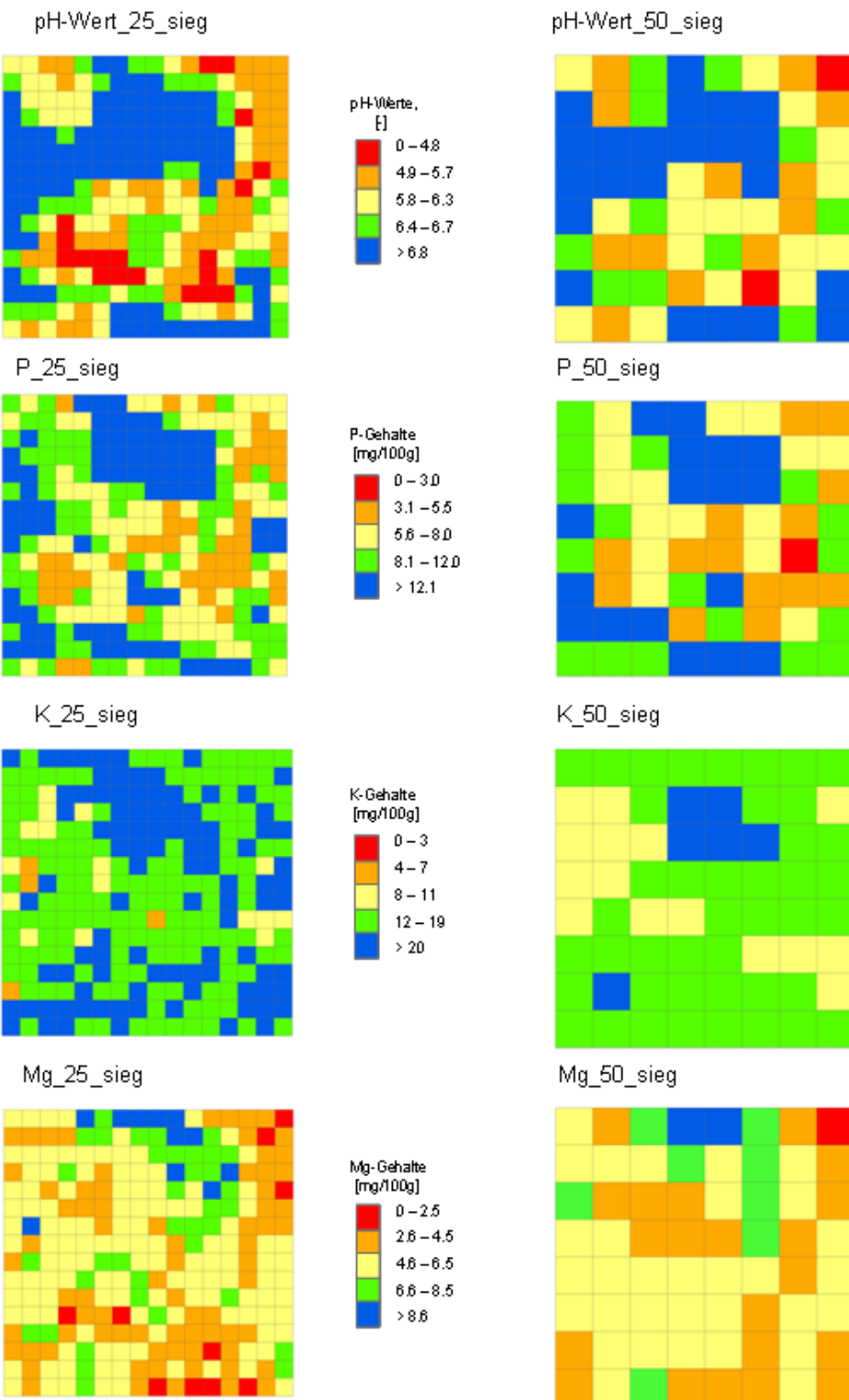
Siegrennbreite

Bild 44: Räumliche Verteilungen der Nährstoffgehalte auf der Grundlage einer Einzelprobenahme im 25 m-Raster und einer Mischprobenahme im 50 m-Raster auf der Siegrennbreite

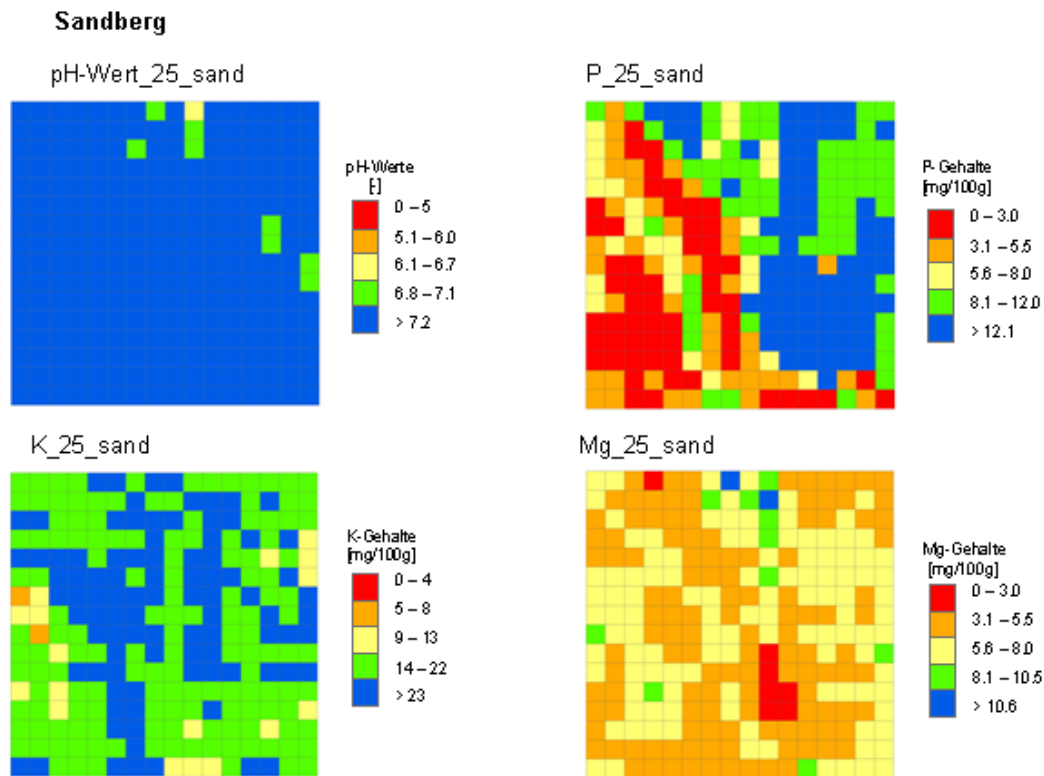


Bild 45: Räumliche Verteilungen der Nährstoffgehalte auf der Grundlage einer Einzelprobe-nahme im 25 m-Raster auf dem Sandberg

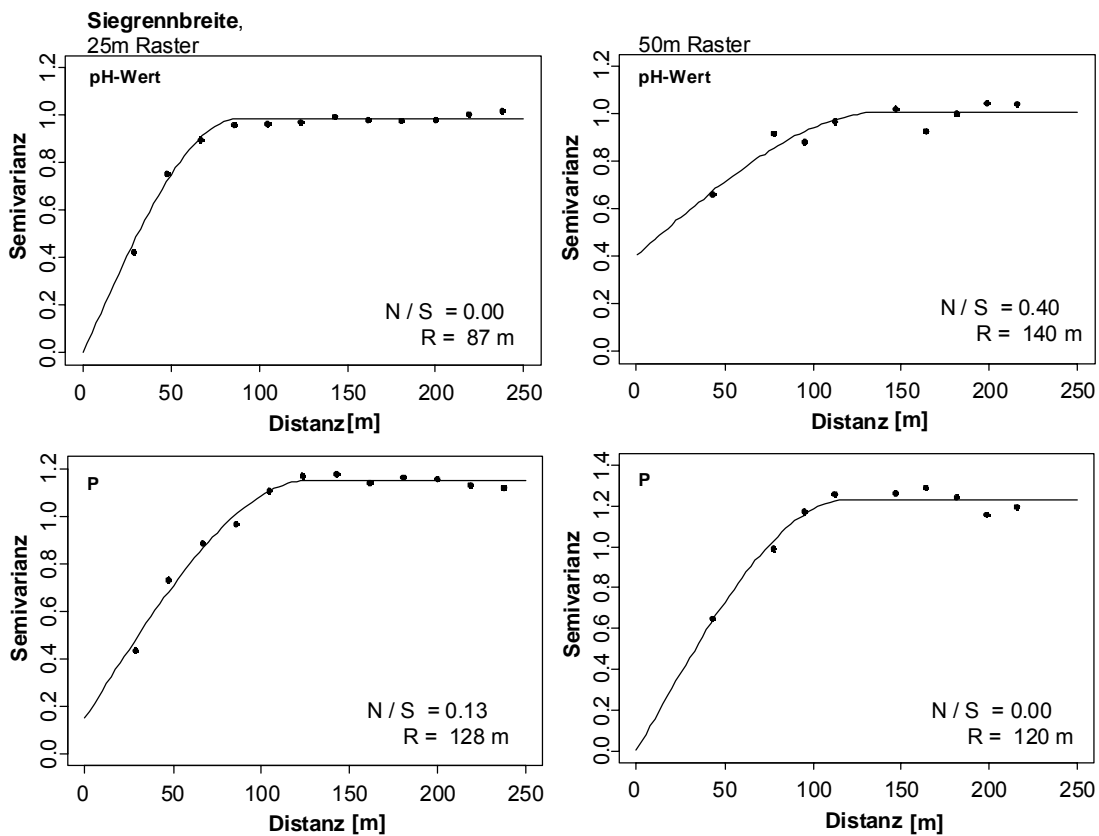
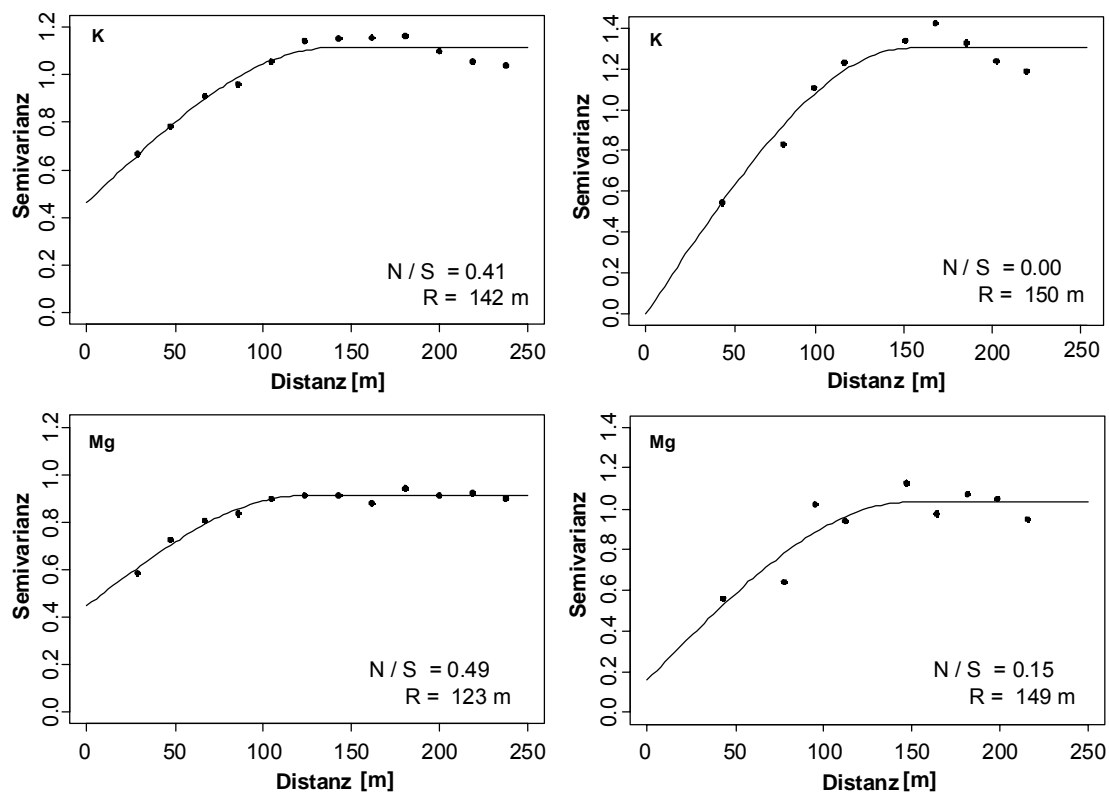
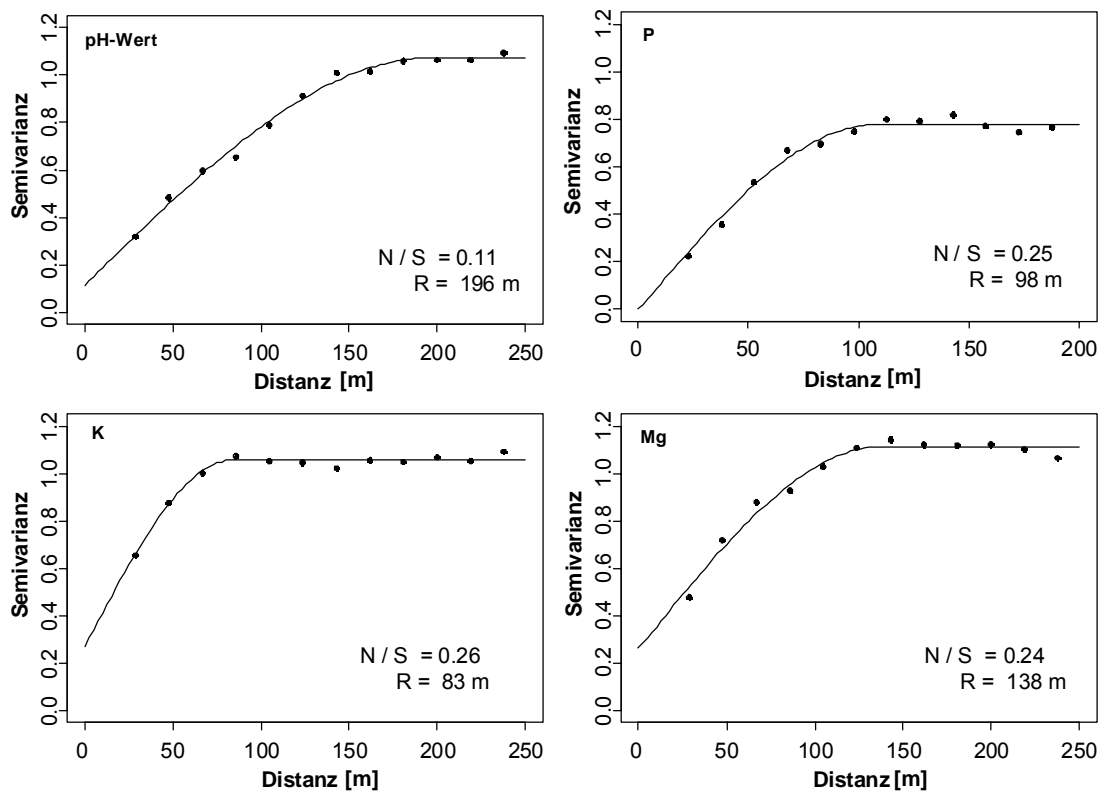


Bild 46: Semivarianzkurven der Nährstoffgehalte für das 25 m- und 50 m-Raster auf der Siegrennbreite (N / S = Nugget-Sill-Verhältnis; R = Range)

**Bild 46:** Fortsetzung

Sandberg, 25m Raster

**Bild 47:** Semivarianzkurven der Nährstoffgehalte für das 25 m-Raster auf dem Sandberg (N / S = Nugget-Sill-Verhältnis; R = Range)

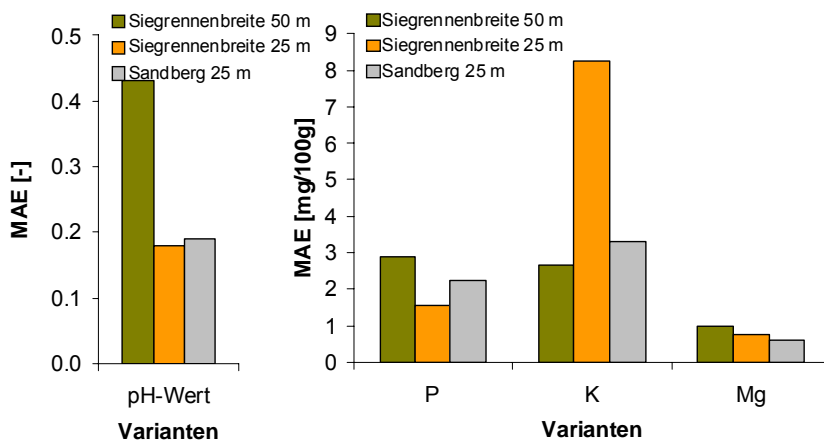


Bild 48: Mittlerer absoluter Fehler der Nährstoffgehalte infolge Interpolation der im 25 m- und 50 m-Raster bestimmten Nährstoffgehalte

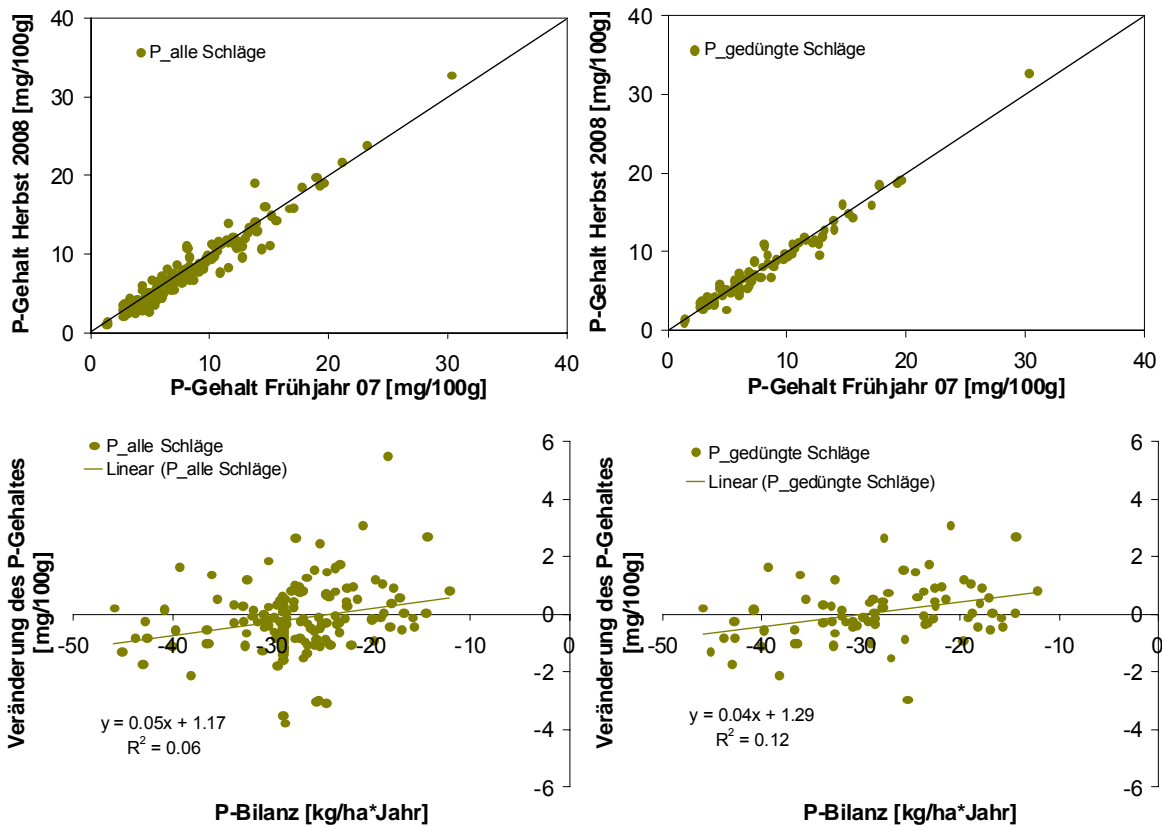


Bild 49: Veränderung der Phosphorgehalte und die Bilanzen für den Zeitraum zwischen dem Frühjahr 2007 und Herbst 2008 auf der Schlaggruppe 1

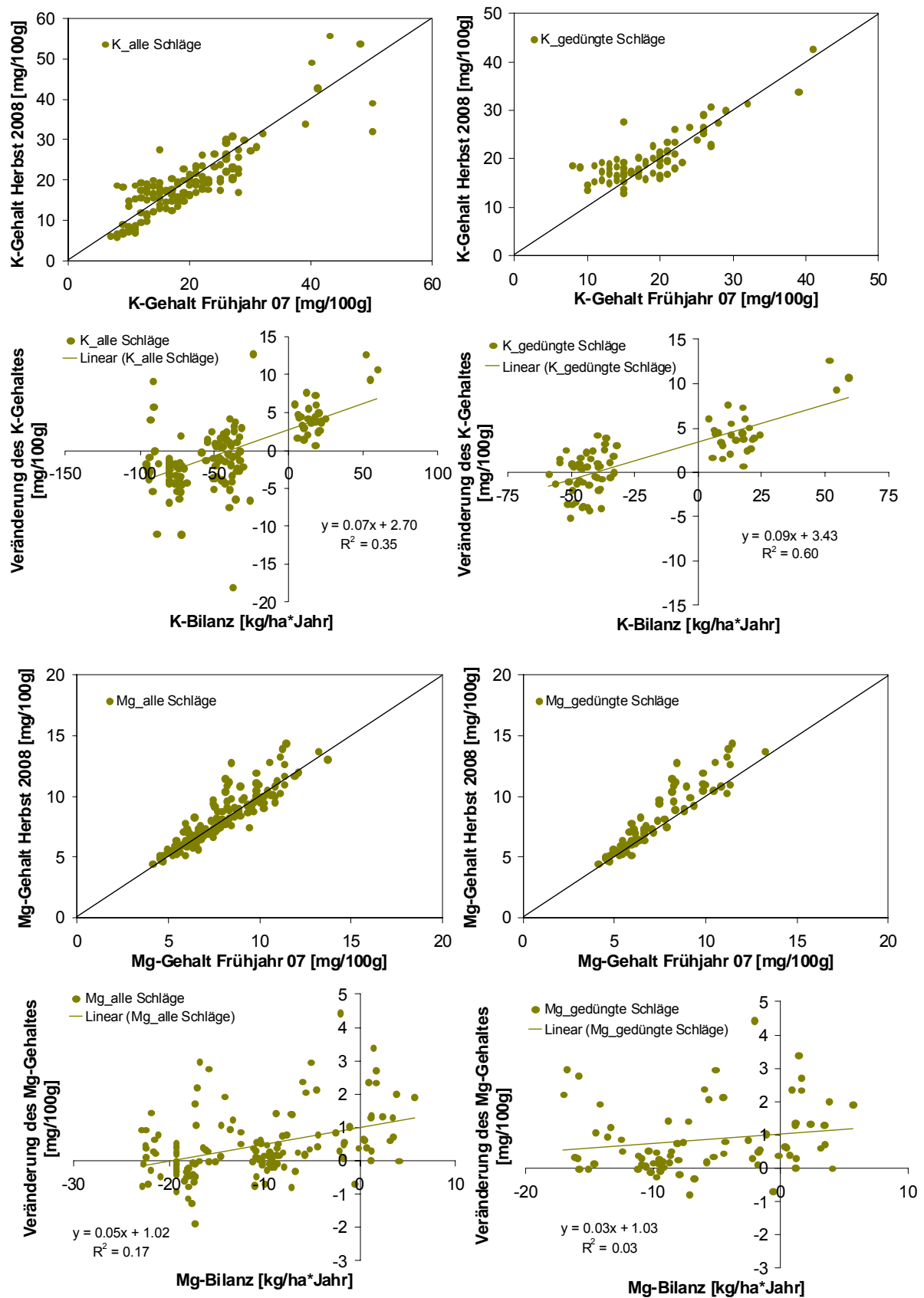


Bild 50: Veränderung der Kalium- und Magnesiumgehalte und die Bilanzen für den Zeitraum zwischen dem Frühjahr 2007 und Herbst 2008 auf der Schlaggruppe 1

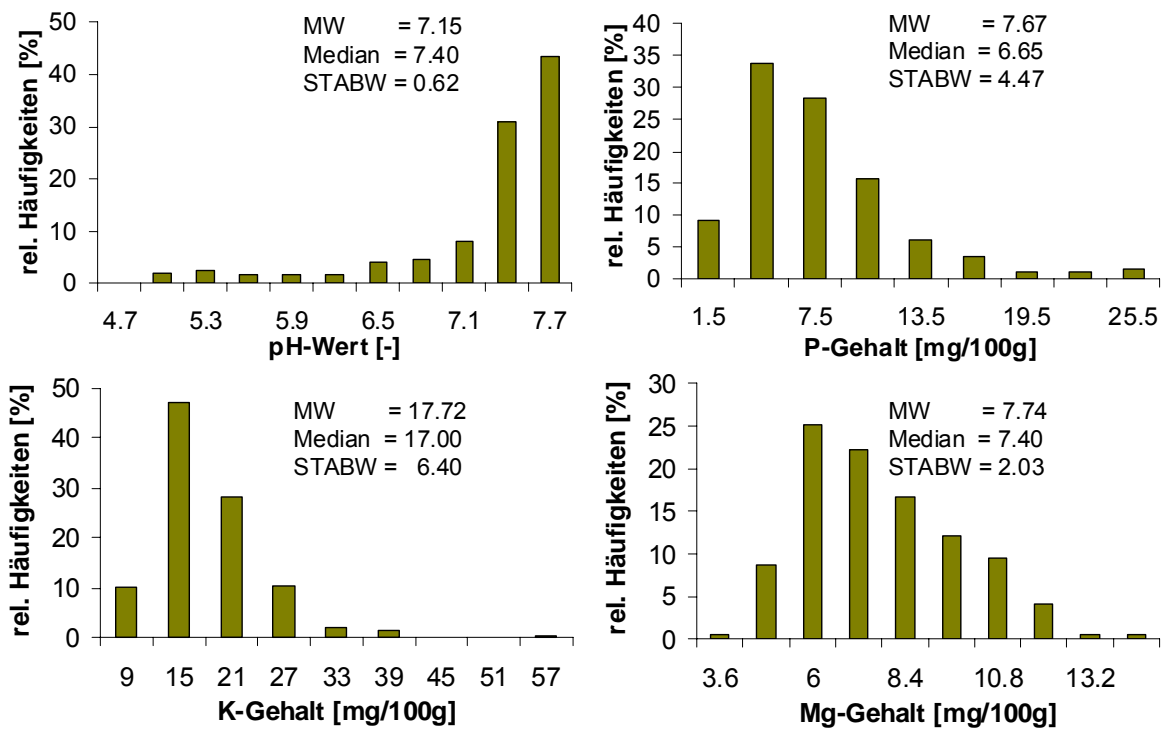


Bild 51: Häufigkeitsverteilungen der Nährstoffgehalte auf der Schlaggruppe 3 im Jahr 2001

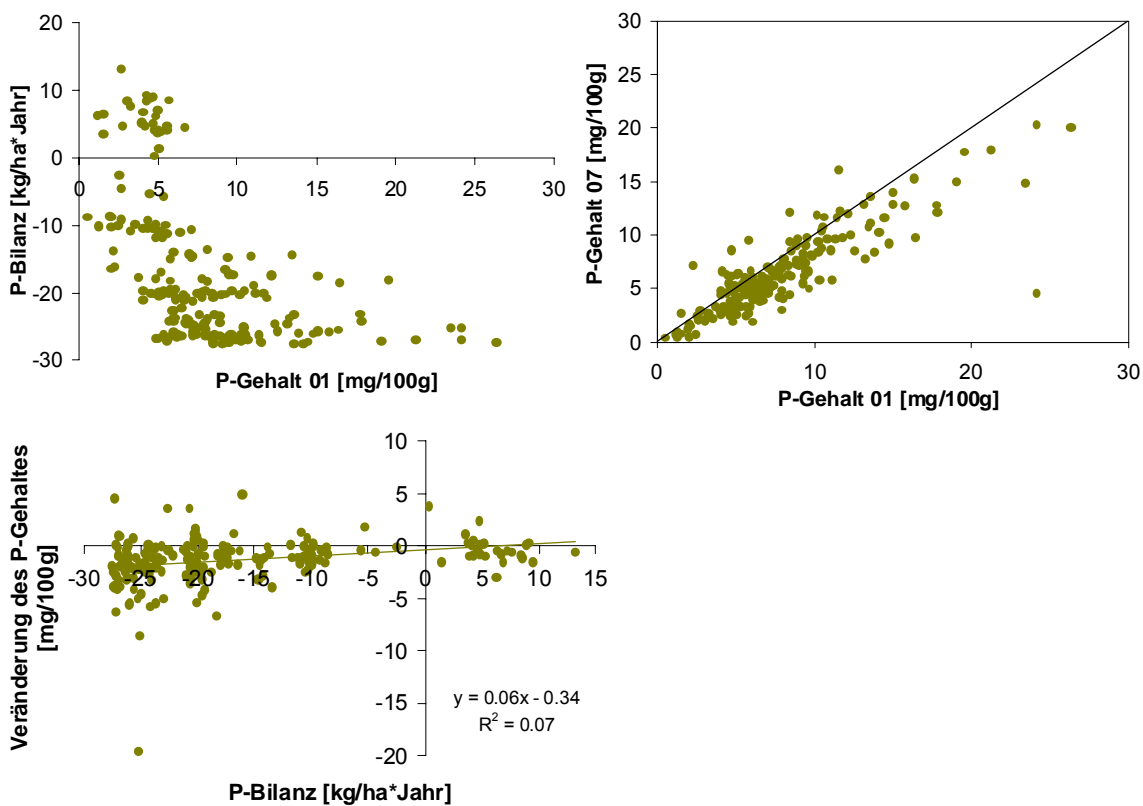


Bild 52: Die Bilanzen und die Veränderung der Phosphorgehalte im Zeitraum zwischen den Jahren 2001 und 2007 auf der Schlaggruppe 3

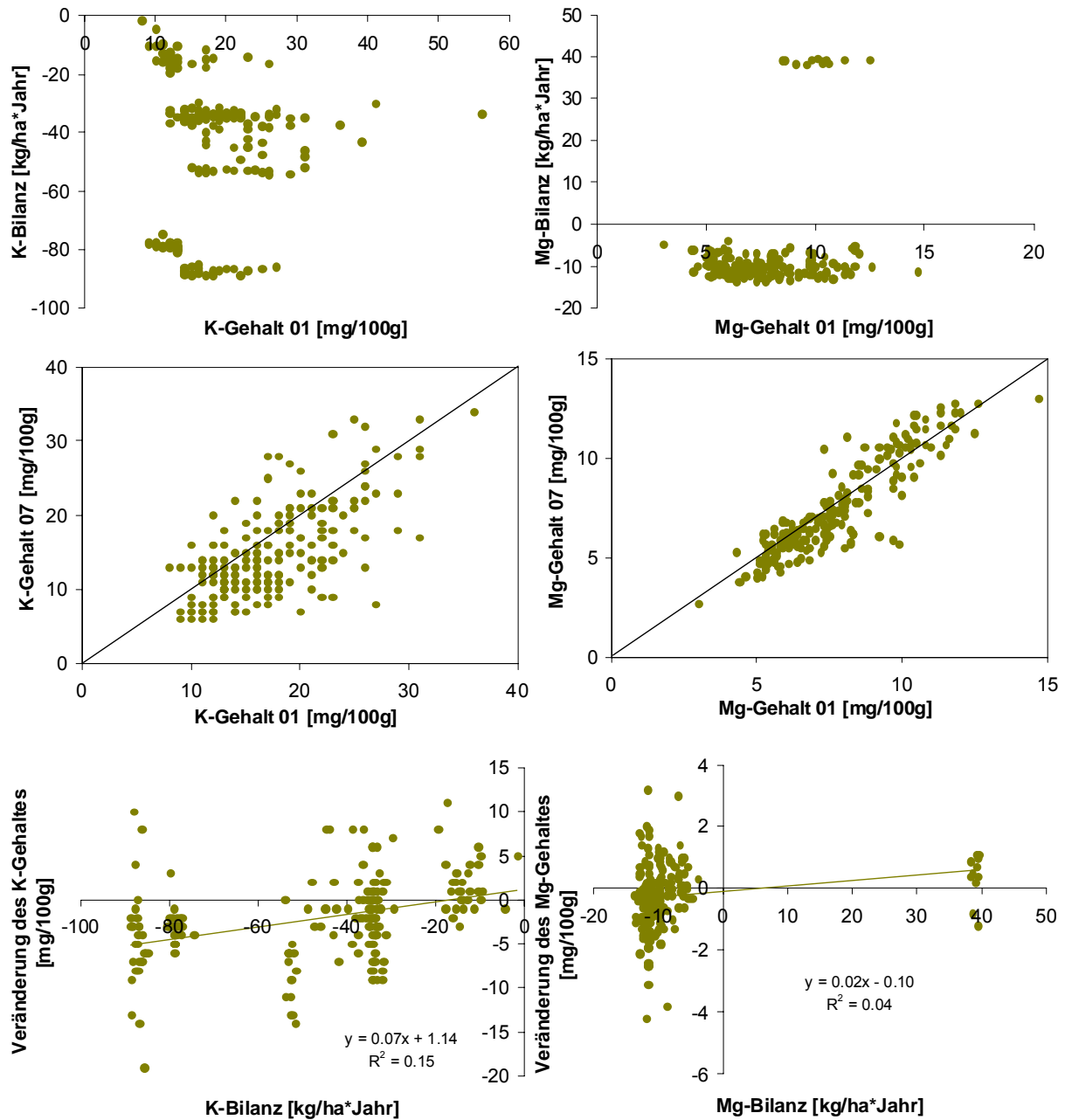


Bild 53: Die Bilanzen und die Veränderung der Kalium- und Magnesiumgehalte im Zeitraum zwischen den Jahren 2001 und 2007 auf der Schlaggruppe 3

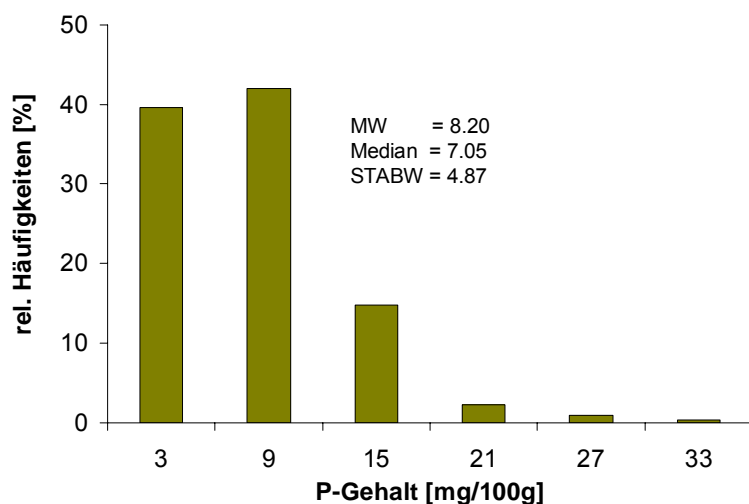


Bild 54: Die Häufigkeitsverteilung des P-Gehaltes auf der Schlaggruppe 4

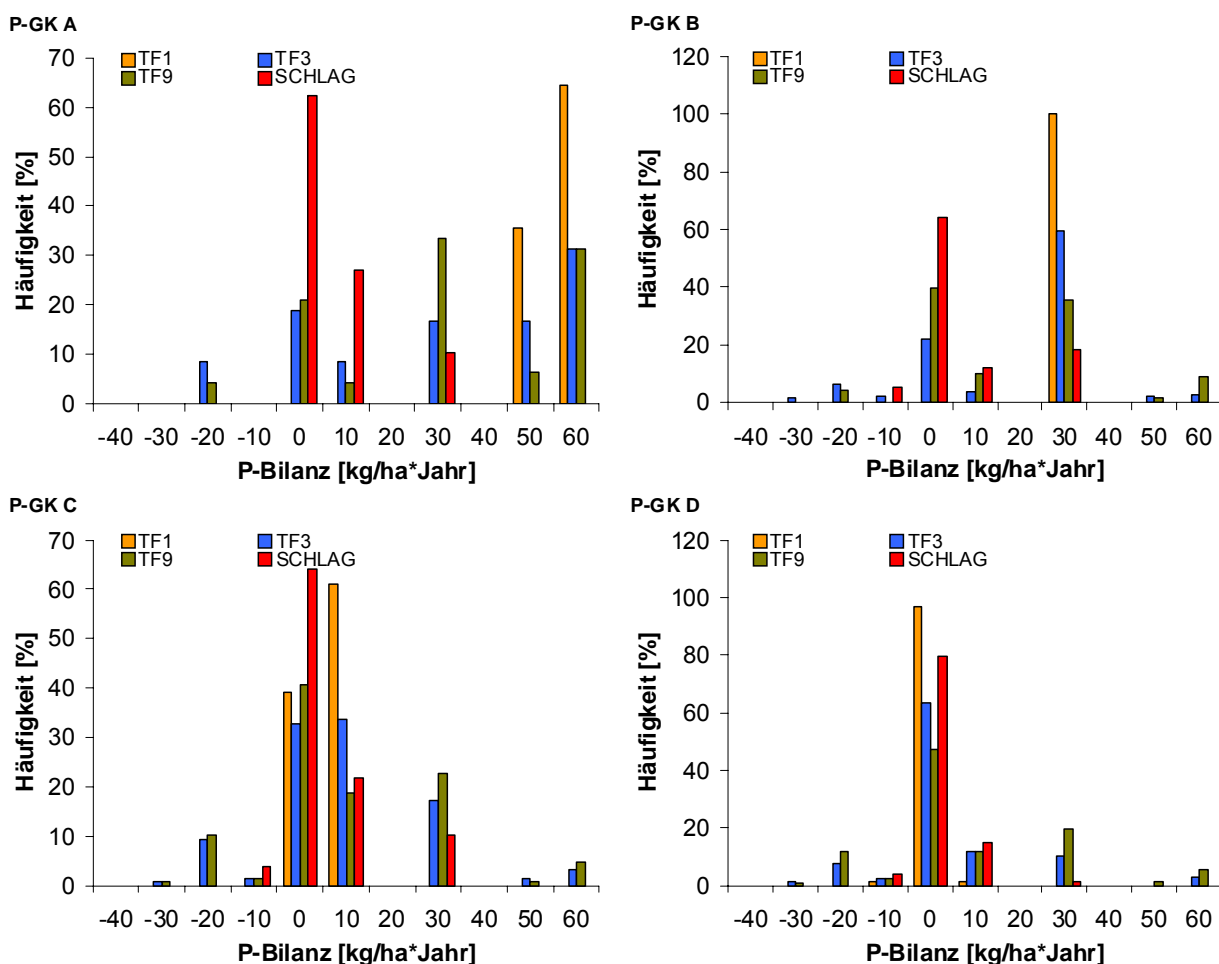


Bild 55: Häufigkeit des Auftretens mittlerer Phosphorbilanzklassen eines sechsjährigen Bilanzzeitraums auf 1 ha-Prüfflächen, sortiert nach den Gehaltsklassen zu Beginn des Bilanzzeitraumes, bei Simulation unterschiedlicher Teilflächengrößen der Probenahme bzw. Düngung auf der Schlaggruppe 4

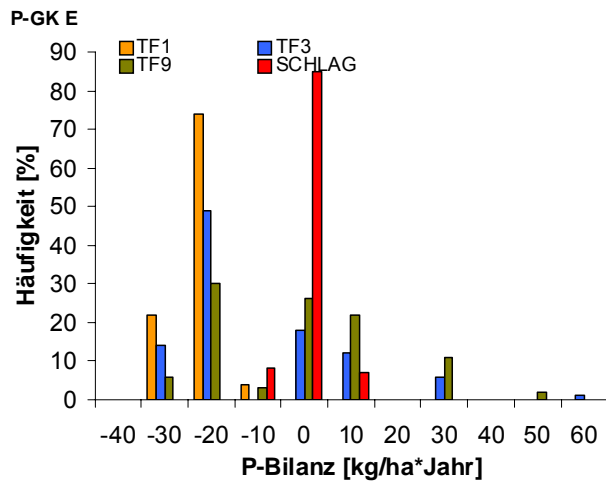


Bild 55: Fortsetzung

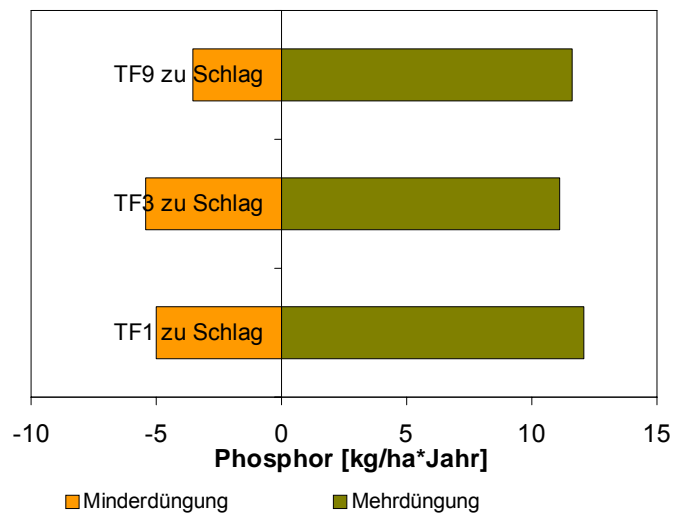


Bild 56: Mittlere Unterschiede im Einsatz des Phosphors auf der Basis von Teilflächen im Vergleich zum Gesamtschlag im Verlauf eines simulierten sechsjährigen Bilanzzeitraumes auf der Schlaggruppe 4

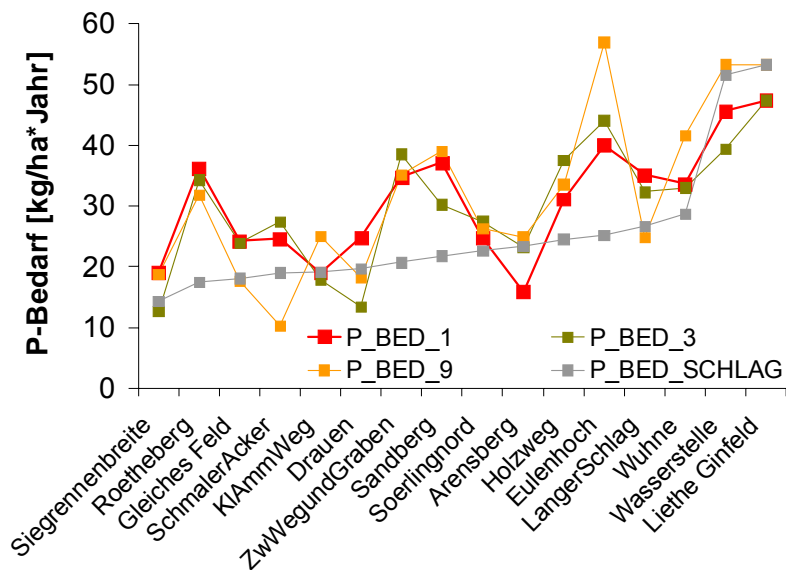


Bild 57: Phosphorbedarf bei schlageinheitlicher Düngung sowie teilflächenspezifischer Düngung auf der Grundlage von 1 ha-, 3 ha- und 9 ha-Teilflächen auf den Schlägen der Schlaggruppe 4

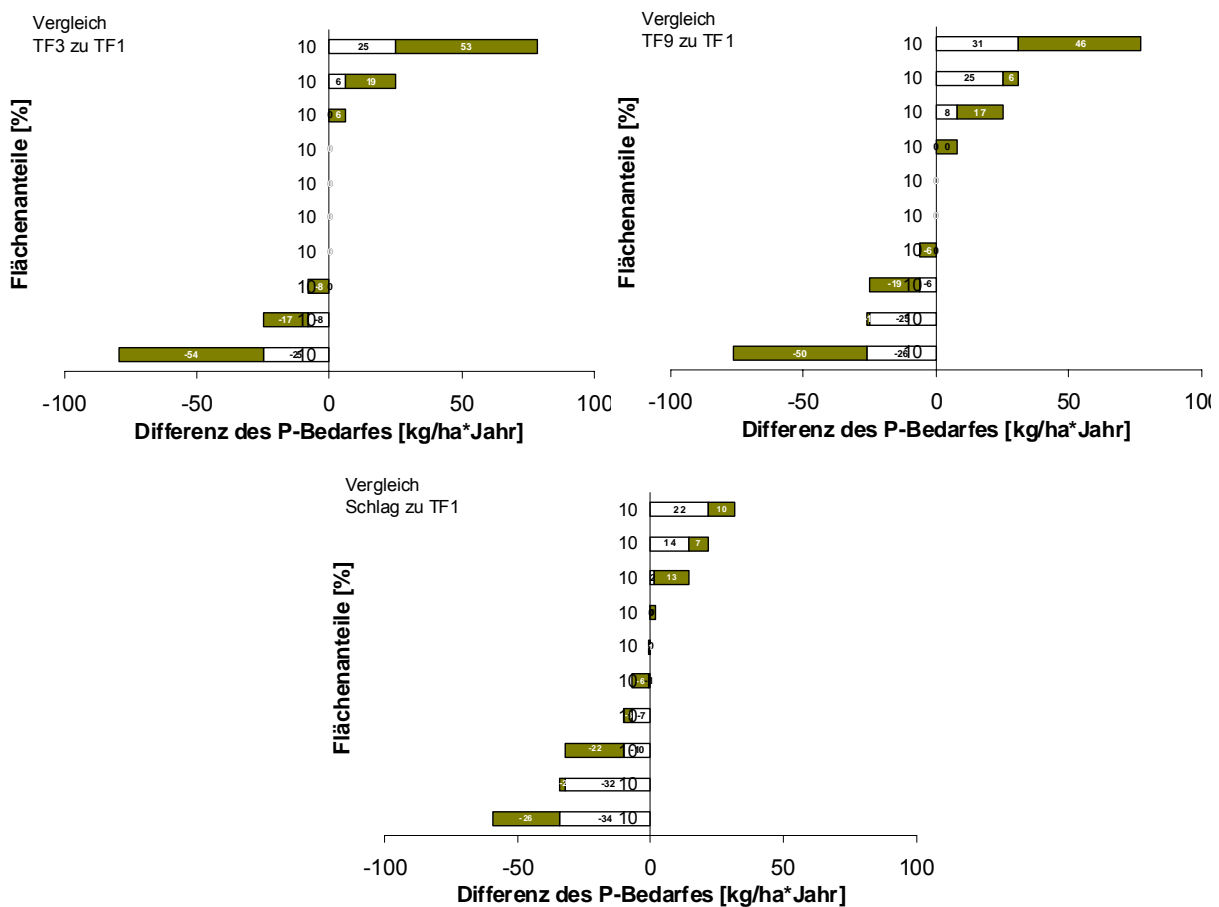


Bild 58: Unterschiede der Phosphorbilanzen auf der Basis größerer Teilflächen im Vergleich zu 1 ha-Teilflächen im Verlauf eines simulierten sechsjährigen Bilanzzeitraumes auf der Schlaggruppe 4, klassiert für jeweils 10 % der Gesamtfläche

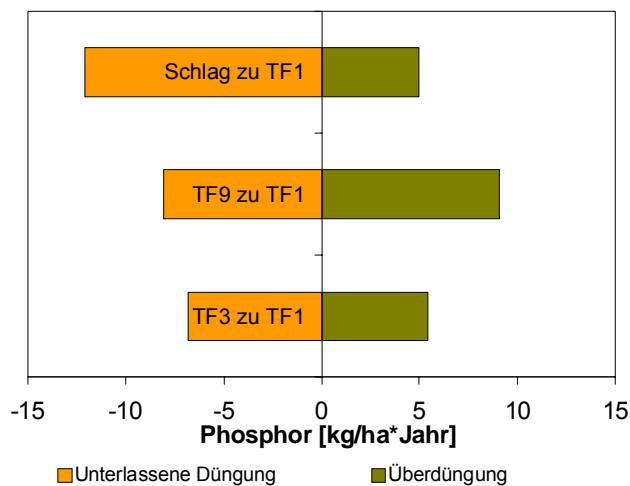


Bild 59: Mittlere Unterschiede im Einsatz des Phosphors auf der Basis größerer Teilflächen im Vergleich zu 1 ha-Teilflächen im Verlauf eines simulierten sechsjährigen Bilanzzeitraumes auf der Schlaggruppe 4

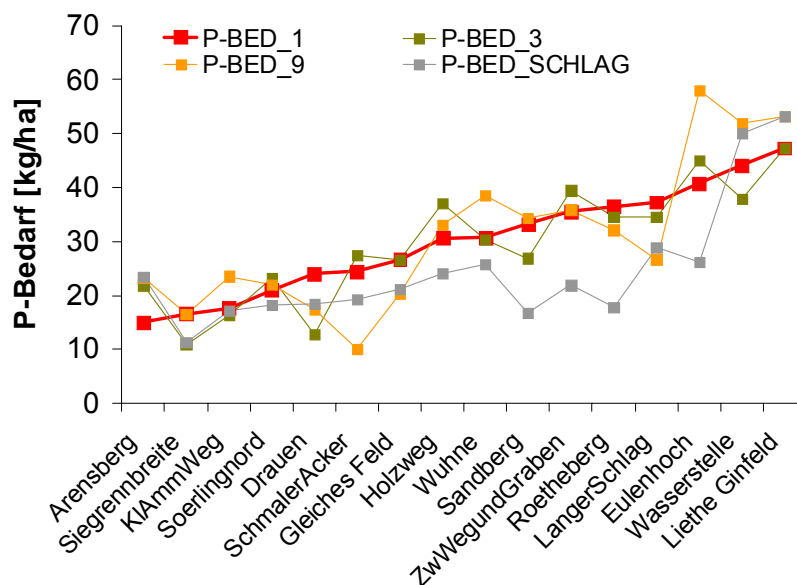


Bild 60: Phosphorbedarf bei teilflächenspezifischer Düngung auf der Grundlage von 1 ha-, 3 ha- und 9 ha-Teilflächen sowie bei schlageinheitlicher Düngung für 16 Schläge der Schlaggruppe 4 in einem Jahr mit Winterweizenanbau

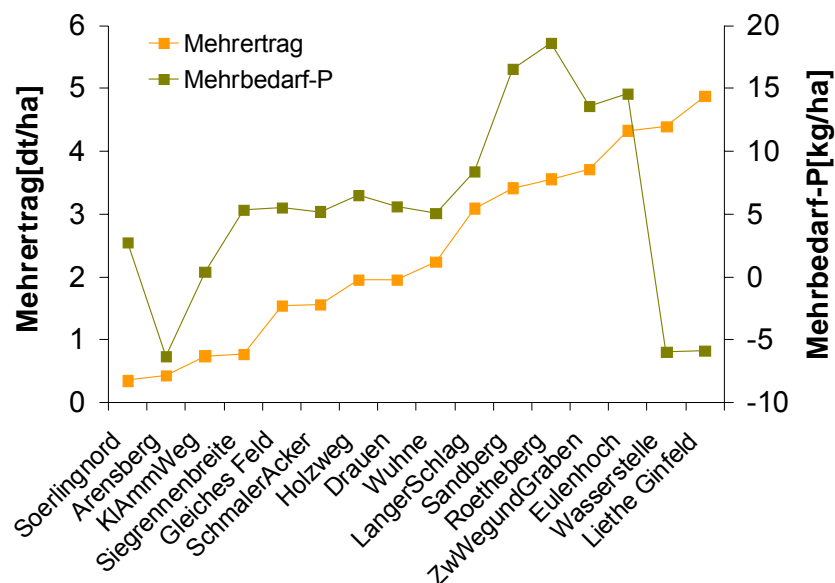


Bild 61: Winterweizenmehrertrag und Phosphormehrbedarf einer teilflächenspezifischen Grunddüngung auf der Basis von 1 ha-Teilflächen im Vergleich zu einer schlageinheitlichen Düngung für 16 Schläge der Schlaggruppe 4 in einem Jahr mit Winterweizenanbau

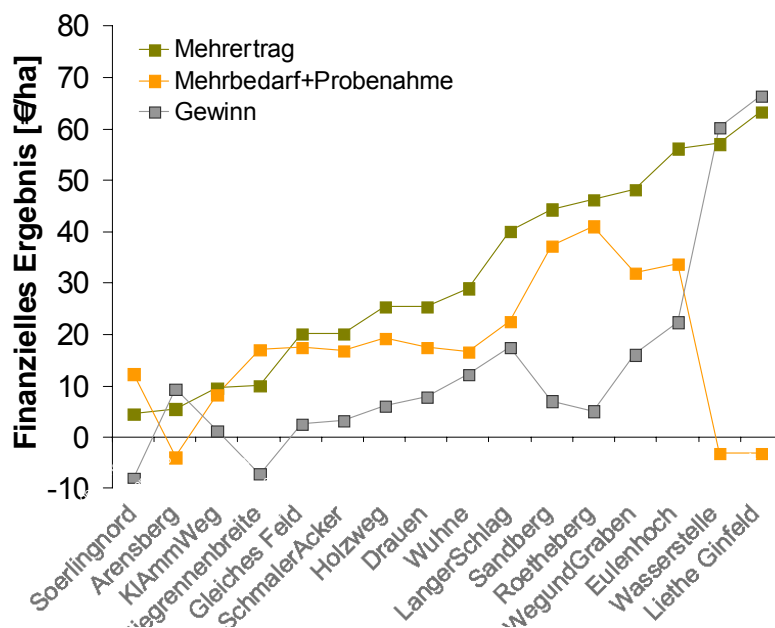


Bild 62: Faktoren des finanziellen Ergebnisses und Gewinn einer teilflächenspezifischen Grunddüngung auf der Basis von 1 ha-Teilflächen im Vergleich zu einer schlageinheitlichen Düngung für 16 Schläge der Schlaggruppe 4 in einem Jahr mit Winterweizenanbau

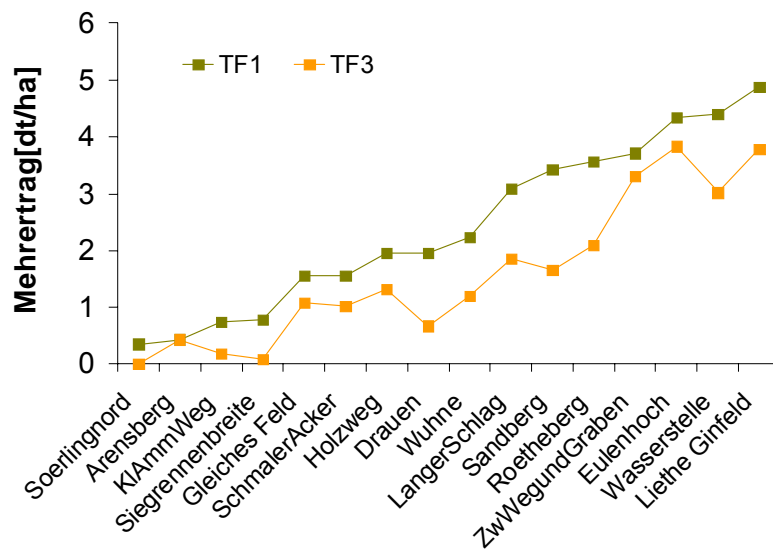


Bild 63: Winterweizenmehrertrag einer teilflächenspezifischen Grunddüngung auf der Basis von 1 ha- und 3 ha-Teilflächen im Vergleich zu einer schlageinheitlichen Düngung für 16 Schläge der Schlaggruppe 4 in einem Jahr mit Winterweizenanbau

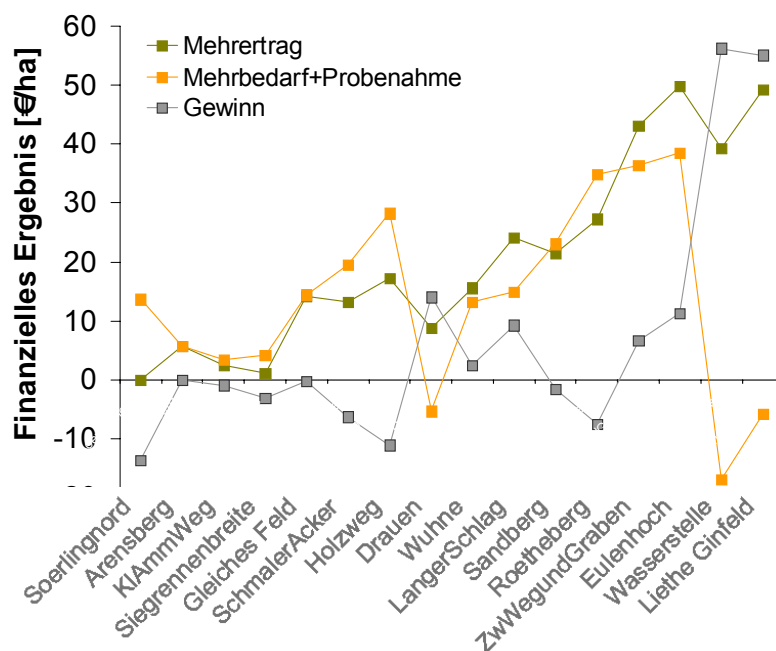


Bild 64: Faktoren des finanziellen Ergebnisses und Gewinn einer teilflächenspezifischen Grunddüngung auf der Basis von 3 ha-Teilflächen im Vergleich zu einer schlageinheitlichen Düngung für 16 Schläge der Schlaggruppe 4 in einem Jahr mit Winterweizenanbau

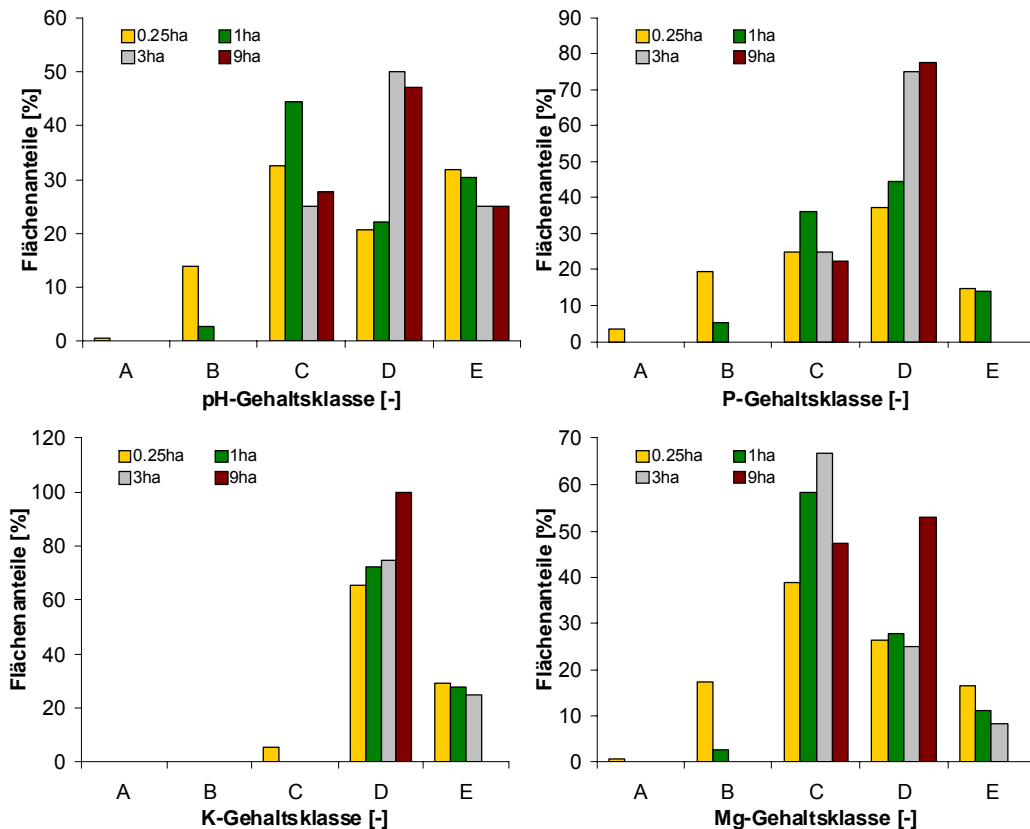


Bild 65: Flächenanteile der Nährstoffgehaltsklassen in Abhängigkeit verschiedener Probenahmeraster (1/4 ha bis 9 ha) auf der Siegrennbreite

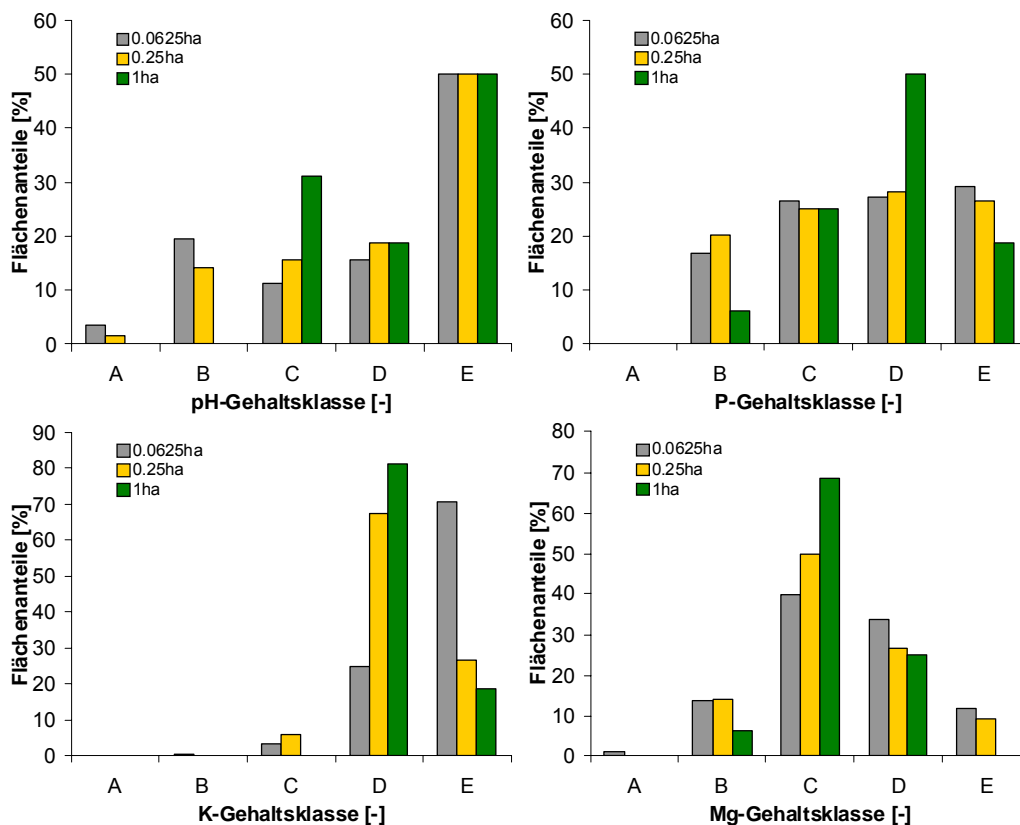


Bild 66: Flächenanteile der Nährstoffgehaltsklassen in Abhängigkeit verschiedener Probenahmeraster (1/16 ha bis 1 ha) auf einer 16 ha-Teilfläche der Siegrennbreite

**In der Reihe
Bornimer Agrartechnische Berichte**

sind bisher erschienen:

Heft 1	Technik und Verfahren der Landschaftspflege	1992
Heft 2	Beiträge zur Lagerung und Verarbeitung pflanzenbaulicher Produkte	1993
Heft 3	Technik und Verfahren in der Tierhaltung	1993
Heft 4	Technik und Verfahren der Landschaftspflege und für die Verwendung der anfallenden Materialien	1994
Heft 5	Verfahrenstechnik der Aufbereitung, Lagerung und Qualitätserhaltung pflanzlicher Produkte	1994
Heft 6	Biokonversion nachwachsender Rohstoffe und Verfahren für Reststoffbehandlung	1994
Heft 7	Preußische Versuchs- und Forschungsanstalt für Landarbeit und Schlepperprüffeld in Bornim 1927 bis 1945	1995
Heft 8	Qualitätssicherung und Direktvermarktung	1996
Heft 9	Konservierende Bodenbearbeitung auf Sandböden	1996
Heft 10	Anwendung wärme- und strömungstechnischer Grundlagen in der Landwirtschaft	1996
Heft 11	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1996	1996
Heft 12	Aufbereitung und Verwertung organischer Reststoffe im ländlichen Raum	1996
Heft 13	Wege zur Verbesserung der Kartoffelqualität durch Verminderung der mechanischen Beanspruchung	1997
Heft 14	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1997	1997
Heft 15	Technische und ökonomische Aspekte der Nutztierhaltung in großen Beständen	1997
Heft 16	11. Arbeitswissenschaftliches Seminar	1997
Heft 17	Nachwachsende Rohstoffe im Land Brandenburg Stand Aktivitäten und Perspektiven einer zukunftsfähigen und umweltgerechten Entwicklung	1998
Heft 18	Qualität von Agrarprodukten	1998
Heft 19	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1998	1998
Heft 20	Beiträge zur teilflächenspezifischen Bewirtschaftung	1998
Heft 21	Landnutzung im Spiegel der Technikbewertung – Methoden Indikatoren, Fallbeispiele	1998

Heft 22	Kriterien der Nachhaltigkeit in der Verfahrensentwicklung für die Nutztierhaltung	1999
Heft 23	Situation und Trends in der Landtechnik / Erneuerbare Energien in der Landwirtschaft	1999
Heft 24	Institut für Landtechnik der Deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin 1951 bis 1965	1999
Heft 25	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1999 / 2000	2000
Heft 26	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2001	2001
Heft 27	Approaching Agricultural technology and Economic Development of Central and Eastern Europe	2001
Heft 28	6 th International Symposium on Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering	2001
Heft 29	Measurement Systems for Animal Data and their Importance for Herd Management on Dairy Cow Farms	2002
Heft 30	Produktion, Verarbeitung und Anwendung von Naturfasern	2002
Heft 31	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2002	2002
Heft 32	Biogas und Energielandwirtschaft - Potenzial, Nutzung, Grünes Gas TM , Ökologie und Ökonomie	2003
Heft 33	Sozioökonomische Aspekte zu Perspektiven des Offenlandmanagements	2003
Heft 34	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2003	2003
Heft 35	Energieholzproduktion in der Landwirtschaft Potenzial, Anbau, Technologie, Ökologie und Ökonomie	2004
Heft 36	High-Tech Innovationen für Verfahrensketten der Agrarproduktion. Statusseminar 2003	2004
Heft 37	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2004	2004
Heft 38	Die Landmaschinenprüfung in der DDR 1951-1991 und ihre Vorgeschichte	2004
Heft 39	Energieverlust und Schimmelpilzentwicklung bei der Lagerung von Feldholz-Hackgut	2005
Heft 40	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2005	2005
Heft 41	Demonstration der Langzeitwirkung bedarfsorientierter Fungizidbehandlung mit dem CROP-Meter	2005
Heft 42	Biochemicals and Energy from Sustainable Utilization of herbaceous Biomass (BESUB)	2005

Heft 43	Ozontes Waschwasser zur Qualitätssicherung leichtverderblicher Produkte - Entwicklung einer <i>Fuzzy-Logic</i> -Steuerung des Waschprozesses	2005
Heft 44	Messsystem zur Bewertung des Unkrautvorkommens	2005
Heft 45	Anwendung der Thermographie zur Optimierung der Belüftungssteuerung bei der Lagerhaltung landwirtschaftlicher Produkte	2005
Heft 46	Membranbioreaktor zur Aufbereitung von Schlachthofabwässern Prozesssteuerung von Biogasanlagen mit Kofermentation	2005
Heft 47	Verschleißeinfluss auf das Förderverhalten von Drehkolbenpumpen	2005
Heft 48	Qualitätserhaltung und Qualitätssicherung von Bioobst und Biogemüse in der Nachernte	2005
Heft 49	Miniaturisiertes Datenerfassungs-System zum Implantieren in Früchte und zur Messung ihrer mechanischen Belastung durch Ernte- und Nachernteverfahren	2005
Heft 50	Prozesskontrolle der Qualität von frischem Obst und Gemüse mit Hilfe eines Multigas-Sensors	2005
Heft 51	Entwicklung eines Echtzeitsensors für die Stärkebestimmung bei Kartoffeln als funktionaler Bestandteil eines optoelektronischen Verleseautomaten	2005
Heft 52	Optimierte Steuerung von Getreide-Schachttrocknern	2005
Heft 53	Möglichkeiten und Grenzen der energetischen Nutzung von Rizinusöl	2005
Heft 54	Non-Destructive Methods for Detecting Health-Promoting Compounds COST Action 924 Working Group Meeting	2005
Heft 55	4 th IFAC / CIGR Workshop Control Applications in Post - Harvest and Processing Technology (CAPPT 2006) 26th - 29th March 2006, Potsdam, GERMANY	2006
Heft 56	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2006	2006
Heft 57	Kontrolle der Frische in der Nacherntekette von Ökogemüse	2006
Heft 58	Entwicklung eines innovativen Dekontaminationsverfahrens als Technologieantwort auf zukünftiges Qualitätsmanagement im Nacherntebereich	2006
Heft 59	Experimental Studies and Mathematical Modelling of Solar Drying System for Production of High Quality Dried Tomato	2007
Heft 60	13. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft & 4. Workshop Precision Farming	2007

Heft 61	Energiepflanzen im Aufwind Wissenschaftliche Ergebnisse und praktische Erfahrungen zur Produktion von Biogaspflanzen und Feldholz	2007
Heft 62	14. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft	2008
Heft 63	Experten-Workshop Lagerung von Holzhackschnitzeln	2008
Heft 64	Postharvest unlimited 2008	2008
Heft 65	Vom Agrarrohstoff zu neuen Produkten – Verfahrens- technische Forschung im Nacherntebereich	2009
Heft 66	16. Arbeitswissenschaftliches Kolloquium des VDI-MEG Arbeitskreises Arbeitswissenschaften im Landbau	2009
Heft 67	Monitoring der methanbildenden Mikroflora in Praxis- Biogasanlagen im ländlichen Raum: Analyse des Ist-Zustandes und Entwicklung eines quantitativen Nachweissystems	2009
Heft 68	Wieviel Biogas steckt in Pflanzen Symposium des "Biogas- Crops-Network" (BCN) 7. Mai 2009 Potsdam	2009
Heft 69	Image Analysis for Agricultural Products and Processes 27. to 28. Aug. 2009 Potsdam	2009
Heft 70	5th International Technical Symposium on Food Processing, Monitoring Technology in Bioprocesses and Food Quality Man- agement 31. Aug. to 02. Sept. 2009 Potsdam	2009
Heft 71	Einsatz von Biogas in PEM-Brennstoffzellen	2009
Heft 72	Teilflächenspezifische Grunddüngung	2009

Interessenten wenden sich an:

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam

Tel.: (0331) 5699-820
Fax.: (0331) 5699-849
E-Mail: atb@atb-potsdam.de

Schutzgebühr: 13,- €