

Diss. ETH No. 16791

Variability in soil chemical and crop yield traits in differently tilled small cereal fields

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

For the degree of
Doctor of Natural Sciences

Presented by

Ruth Maria Hausherr Lüder
Dipl. Ing. Agr. ETH Zurich

Born September 21, 1964
Citizen of Jonen (AG)

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. P. Stamp, examiner
Dr. W. Richner, co-examiner
Prof. Dr. P. J. Edwards, co-examiner

Zurich, 2006

Summary

The trends of the last century continue: growth of the human population and proceeding loss of agricultural land. The world population is expected to double by the end of the 21st century. Soil is being lost through soil degradation due to the excessive removal of vegetation, by desertification and civil engineering. Hence the challenge is to produce sufficient food for a growing population on a smaller area of cropland. Precision agriculture is one option for increasing profitability and reducing the negative environmental impact of arable cropping. Site-specific crop management takes into account soil and crop requirements as they vary in time and space within a field and aims at enhancing nutrient use efficiency. Conservation tillage, including no-tillage, its most extreme form, may contribute to more sustainable agriculture. No-tillage may avoid runoff and erosion as well as soil compaction (plow pans). However, only few studies have dealt with the spatial variability of soil and crop parameters and their relationships in small arable fields typical of Switzerland and other regions in Europe or with the impacts of tillage on spatial patterns of soil and crop traits.

The major objectives of this study were:

- (i) to investigate the degree of spatial variation in soil traits of small fields, typical of the Swiss midlands, and to determine the impact of soil heterogeneity on the spatial variability of crop yield (Chapter 1).
- (ii) to assess how tillage intensity modifies the spatial variability of soil and plant parameters in small cereal fields (Chapter 2).
- (iii) to determine whether within-field soil variability affects the yield and nitrogen use efficiency (NUE) of winter wheat and whether soil disturbance (tillage intensity) modifies the N response of these parameters (Chapter 3).

Chapter 1: To examine objective (i) the spatial patterns of soil and crop traits were investigated in 1995 (Gränichen and Zollikofen) and 1996 (Schafisheim) in three typical small fields (about two hectares) in the Swiss midlands under humid-temperate conditions. Two fields have Orthic Luvisol (FAO classification) soil, one with a loamy (Gränichen) and the other with a sandy-loam (Schafisheim) soil texture. The soil of the third field (Zollikofen) is a Gleyic Cambisol, with a loamy-silt texture. In the topsoil (0-20 cm) the pH (H₂O), soil-test K and P, total N and organic matter contents were sampled in a regular grid at an average sampling interval of 11 m. To investigate the spatial variability of grain yield, two fields (Gränichen and Zollikofen) were cropped with spring oat (*Avena sativa* L.). Classical descriptive statistics and geostatistical analyses were used to characterize the soil and crop variability. In the two oat fields, some of the measured soil properties and the grain yield varied considerably, and strong spatial trends were present for most of the soil traits. In the third field, the soil properties showed only a moderate spatial variation, and no spatial trends were found. Total soil N was correlated with soil organic matter and soil-test P was correlated with soil pH in all three fields. Contents of soil organic matter and total N and soil-test P and K showed a strong spatial dependency in one oat field, where both soil organic matter and total N were spatially correlated with grain yield. Soil pH and soil-test P showed strong spatial dependence in the other oat field, in which soil-test P was weakly correlated with grain yield. Our data suggest that variable-rate application of N, P, K and lime could improve the fertilizer use efficiency in at least two of the three investigated small fields in the Swiss midlands.

Chapter 2: To assess objective (ii) the impact of tillage systems on the small-scale variability of soil chemical properties and winter wheat (*Triticum aestivum* L.) grain yield and N uptake were studied in field trials with small plots (12 x 35 m) in two of the three fields described in Chapter 1 (Zollkofen in 1999, Schafisheim in 1999 and 2000).

The spatial variability of total N (N_{tot}), total C (C_{tot}) and pH (H_2O) was assessed by soil sampling after the harvest of winter wheat in a regular nested grid with sampling intervals of 3 and 1 m at 0 to 30 cm depth (15 cm increments) on a total of nine non-tilled (NT) and nine conventionally tilled (CT) plots. At every grid point, 1 m² of winter wheat was cut to record the spatial variability of biomass, grain yield, N uptake and grain protein concentration.

There was a clear stratification of N_{tot} and C_{tot} in the topsoil of the NT plots after only three (Schafisheim) and four years (Zollkofen) of transition to no-tillage. Small-scale structural variance of soil N_{tot} , C_{tot} and pH was slightly larger in NT than in CT in the top soil (0-15 cm) in the management (tillage) direction of the field. In the 15-30 cm soil layer the structural variance of N_{tot} and C_{tot} was similar in both tillage systems. The ranges of spatial dependence tended to be larger under NT than under CT, and the spatial dependence of the soil properties mostly was stronger for NT than CT. The small-scale variability of the soil chemical parameters was also affected by the direction of crop management. The ranges of N_{tot} , C_{tot} as well as pH were broader in the length of the rows (management direction) than across the rows.

The small-scale variability of the winter wheat parameters was slightly greater in NT than in CT. Spatial relationships between soil chemical properties (N_{tot} , C_{tot} , and pH) and crop parameters (grain yield, N content of grains) were rather weak but were more pronounced in NT than in CT. These weak relationships were probably due to the relatively small extent of the small-scale variability of N_{tot} , C_{tot} , pH, grain yield, N content of grains, grain protein concentration and SPAD readings in NT and CT, possibly due to the recurrent and even distribution of sufficient amounts of soil nutrients.

In brief, the spatial dependence of the soil and plant parameters was weak to moderate, suggesting only a small potential for the variable-rate application of N fertilizer and lime. Because of the slightly larger structural variance and stronger spatial dependence of soil chemical properties this potential may be greater for non-tilled soils.

Chapter 3: In the same field area as described in Chapters 1 and 2 we investigated (Schafisheim 1999 and Schafisheim 2000) the spatial variation of soil mineral N (N_{min}) at the beginning of vegetation, as well as the spatial variability of grain yield, grain protein concentration and nitrogen use efficiency (NUE) of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) as affected by N fertilization on non-tilled (NT) and conventionally tilled (CT) plots (12 m x 35 m) (iii).

The experimental design was a randomized complete block design with three replications for the experimental factor "tillage system". Within each tillage plot, the rates of N fertilization (0, 50, 100, 150 and 200 kg N ha⁻¹ in 1999 and 2000 and, additionally, 250 kg N ha⁻¹ in 2000 only) were completely randomized within four groups of microplots (microplot size: 1.5 m x 1.5 m), located about 10 m from each other. In total, there were 12 randomized N-rate experiments for each tillage system in each year.

Soil N_{min} at the beginning of vegetation, grain yield and NUE, averaged across all the N treatments showed significant variability among within-plot positions of both the NT and CT systems. Grain yield and aboveground plant N were not correlated with N_{min} , measured before the application of N fertilizer. NT usually led to a greater spatial heterogeneity of N_{min} , grain yield and NUE compared with CT, whereas grain protein concentration was not affected by tillage intensity and showed hardly any spatial variation. The grain protein concentrations were high, ranging from 115 g kg⁻¹ at 0 kg N ha⁻¹ to 169 g kg⁻¹ at 250 kg N ha⁻¹.

The small-scale variability of grain yield, grain protein concentration, NUE and estimated N supply decreased with increasing rates of N fertilization under both tillage systems. Significant increases in grain yield and grain protein concentrations were observed with increasing N rates, whereas NUE decreased slightly with increasing N rates in NT and CT. Under the humid-temperate climate of the Swiss midlands grain yield and NUE were lower under NT than under CT at fertilization rates below 150 kg N ha⁻¹. In the two years of the study the grain yield was stable under CT and more variable under NT due to a lower plant density after the severe winter in 1999.

The overall moderate spatial variation in N_{min}, grain yield and NUE did not justify the implementation of variable rates of N fertilizer within these small fields, with the exception of the stony within-plot positions, which were not responsive to N rates higher than 50 kg N ha⁻¹.

The results of all the experiments of the three chapters lead to the conclusion that there is a moderate potential for variable-rate fertilizer application in small fields typical of the Swiss midlands. This potential is probably greater in the NT than in the CT fields due to greater small-scale variability, wider ranges of influence, larger structural variance and stronger spatial dependence of soil chemical properties in the topsoil (0 – 15 cm) in NT than in CT. The second necessary step towards precision agriculture is to determine whether there is temporal consistency in the observed spatial patterns of soil and yield traits; however, this could not be investigated within the framework of this study.

Zusammenfassung

Die Trends des letzten Jahrhunderts gehen weiter: Die Weltbevölkerung wächst, während der Verlust an landwirtschaftlich nutzbarem Boden fortschreitet. Gemäss Prognosen könnte sich die Weltbevölkerung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts verdoppeln. Boden aber und dessen Fruchtbarkeit gehen verloren durch Erosion und zu intensiver Bodennutzung, durch das Vordringen der Wüsten und Überbauung. Demzufolge gewinnt die Herausforderung an Bedeutung, genügend Nahrung für eine wachsende Bevölkerung zu produzieren auf einer stets abnehmenden Produktionsfläche. Precision Agriculture ist ein Ansatz zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und des Boden- und Umweltschutzes in der ackerbaulichen Produktion. Teilflächenspezifische Bewirtschaftung berücksichtigt die zeitliche und räumliche Variabilität der Boden- und Pflanzenansprüche innerhalb eines Feldes, und kann deshalb die Effizienz der Düngung steigern. Eine bodenschonende Saatbeetbereitung, einschließlich der Direktsaat als ihre extremste Form, könnten zu einer verstärkt nachhaltigen Landwirtschaft beitragen. Die Direktsaat minimiert die Oberflächenabschwemmung sowie die Bodenerosion und die Bodenverdichtung (Pflugsohlen). Allerdings haben sich bis jetzt nur wenige Studien mit der räumlichen Variabilität von Boden- und Pflanzeigenschaften und deren gegenseitigen räumlichen Beziehungen innerhalb kleiner Ackerlandflächen, wie sie für die Schweiz und andere europäische Regionen typisch sind, befasst. Ebenso wenig wurde der Einfluss der Bodenbearbeitungsintensität auf die räumliche Verteilung von Boden- und Pflanzenparametern untersucht.

Die Hauptziele dieser Arbeit waren:

- (i) das Ausmass an räumlicher Variabilität von Bodeneigenschaften innerhalb kleiner Felder, typisch für das Schweizer Mittelland, zu untersuchen, und den Einfluss der räumlichen Heterogenität des Bodens auf den Getreideertrag zu bestimmen (Kapitel 1).
- (ii) zu beurteilen wie die Intensität der Bodenbearbeitung die räumliche Variabilität von Boden- und Pflanzeigenschaften in kleinen Getreidefeldern modifiziert (Kapitel 2).
- (iii) zu erforschen, ob die Bodenvariabilität innerhalb eines Feldes den Ertrag und die Effizienz der Stickstoffdüngerausnutzung von Winterweizen beeinflusst und ob da Ausmass der Störung des Bodens (Intensität der Bodenbearbeitung) die Reaktion dieser Pflanzenparameter verändert (Kapitel 3).

Kapitel 1: Zur Prüfung des Ziels (i) untersuchten wir 1995 (in Gränichen und Zollikofen) und 1996 (Schafisheim) die räumlichen Beziehungen zwischen direkt gesäten Getreidebeständen und bodenchemischen Eigenschaften innerhalb von drei typisch kleinen Feldern (ungefähr zwei Hektaren gross) unter dem kühl-gemässigten Klima des Schweizer Mittellandes. Zwei Felder gehören zur Klasse „Orthic Luvisol“ (FAO Klassifizierung) und haben eine lehmige (Gränichen) und eine sandige Lehm-Textur (Schafisheim). Der Boden des dritten Feldes (Zollikofen) gehört zur Klasse „Gleyic Cambisol“ und hat eine lehmige Schluff-Textur. Im Oberboden (0-20 cm) wurden der pH-Wert (H₂O) und die Gehalte an P, K, Gesamtstickstoff, und organischer Substanz in einem regelmässigen Rastergitter mit einem mittleren Beprobungsabstand von 11 m erfasst. Zur Erforschung der räumlichen Variabilität des Pflanzenertrags wurden zwei Felder (Gränichen und Zollikofen) mit Sommerhafer (*Avena sativa* L.) bestellt. Für die Charakterisierung der räumlichen Streuung der Pflanzen- und Bodeneigenschaften wurden klassische beschreibende Statistik sowie Geostatistik herangezogen. Innerhalb der zwei Sommerhaferfelder variierten einige der untersuchten

Bodenparametern sowie der Körnerertrag beachtlich. Die meisten Bodenvariablen zeigten strenge räumliche Trends an. Innerhalb des dritten Feldes variierten die Bodeneigenschaften nur mässig und keine Trends waren zu erkennen. Der totale Stickstoffgehalt des Bodens korrelierte in allen drei Feldern mit der organischen Substanz und der pflanzenverfügbare Phosphorgehalt mit dem pH-Wert des Bodens. Die Bodengehalte an organischer Substanz, Gesamtstickstoff, P und K wiesen in einem Haferfeld eine strenge räumliche Abhängigkeit auf; hier waren die organische Substanz und der Gesamtstickstoff mit dem Kornertrag korreliert. pH-Wert und P-Gehalt des Bodens waren im anderen Haferfeld stark räumlich abhängig, wobei der P-Gehalt schwach mit dem Kornertrag korreliert war. Unsere Daten deuten an, dass ein teilflächenspezifisches Ausbringen von N, P, K und Kalk die Düngerausnutzungseffizienz in wenigstens zwei von den drei untersuchten kleinen Feldern im Schweizer Mittelland verbessern könnte.

Kapitel 2: Zur Erforschung des Ziels (ii) wurde der Einfluss der Bodenbearbeitung auf die kleinräumliche Variabilität von bodenchemischen Eigenschaften und des Ertrags sowie der N Aufnahme von Winterweizen untersucht. Dazu wurden Feldversuche in kleinen Parzellen (12 x 35 m) innerhalb zwei der drei Felder, die in Kapitel 1 beschrieben worden sind (Zollikofen 1999, Schafisheim 1999 and Schafisheim 2000), durchgeführt.

Die räumliche Variabilität des Gesamtstickstoffs (N_{tot}), Gesamtkohlenstoffs (C_{tot}) und des pH-Werts (H_2O) des Oberbodens wurde nach der Winterweizenernte in einem regelmässig verschachtelten Rastergitter von jeweils 3 m beziehungsweise 1m Abstand in neun Parzellen ohne Bodenbearbeitung (NT) und in neun gepflügten Parzellen (CT) in den Bodenschichten 0 bis 30 cm und 0 bis 15 cm untersucht. An jedem Punkt des Rastergitters wurde auf einer Fläche von 1 m² der Winterweizen geerntet, um die räumliche Variabilität von Biomasse, Kornertrag, Kornproteinkonzentration und N-Aufnahme zu bestimmen.

Im Oberboden wurde nach nur drei (Schafisheim) beziehungsweise vier Jahren (Zollikofen) nach der Umstellung auf Direktsaat eine klare Schichtung von N_{tot} und C_{tot} in den Parzellen ohne Bodenbearbeitung festgestellt.

Die kleinräumige strukturelle Varianz von N_{tot} , C_{tot} und pH-Wert des Bodens war in der Bodenschicht von 0-15 cm in der Bewirtschaftungsrichtung (Pflügen) des Feldes leicht grösser in NT als in CT. In der 15-30-cm-Bodenschicht war die strukturelle Varianz von N_{tot} und C_{tot} ähnlich gross in NT und CT. Die Reichweiten (m) der räumlichen Abhängigkeit waren in NT tendenziell länger als in CT, und die räumliche Abhängigkeit der Bodenparameter war meistens stärker für NT als für CT. Die kleinräumige Variabilität der bodenchemischen Parameter war auch von der Richtung der Bewirtschaftung des Bodens und der Kulturen beeinflusst. Die Reichweiten (m) der räumlichen Abhängigkeit von N_{tot} , C_{tot} sowie des pH-Wert waren länger in der Längsrichtung (Bodenbearbeitung) als in der Richtung quer zu den Kulturreihen.

Die Parameter des Winterweizens wiesen in NT eine leicht grössere kleinräumige Variabilität auf als in CT. Die räumlichen Beziehungen zwischen den bodenchemischen Eigenschaften (N_{tot} , C_{tot} , und pH-Wert) und Pflanzenparametern (Kornertrag, N-Gehalt der Körner) waren ziemlich schwach, jedoch ausgeprägter in NT als in CT. Möglicherweise waren diese Beziehungen untereinander nicht stärker wegen des insgesamt relativ kleinen Ausmasses an gefundener kleinräumiger Variabilität von N_{tot} , C_{tot} , pH, Kornertrag, N-Gehalt der Körner, Kornproteinkonzentration und SPAD Messwerten in NT und in CT. Die kleinräumige Variabilität wiederum war wahrscheinlich nicht grösser aufgrund der regelmässigen und ausgeglichenen Verteilung von genügend grossen Mengen von Nährstoffen durch die Düngung.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die räumliche Abhängigkeit der überprüften Boden- und Pflanzenparameter schwach bis mässig stark ausgeprägt war. Daraus geht hervor,

dass für diese Kleinparzellen nur ein geringfügiges Potential für eine teilflächenspezifische Applikation von Stickstoffdünger und Kalk in den untersuchten Feldgrößen besteht. Infolge leicht stärkerer struktureller Varianz und grösserer räumlicher Abhängigkeit der Bodeneigenschaften dürfte dieses Potential für NT höher sein als für CT.

Kapitel 3: Innerhalb derselben Feldfläche wie in Kapitel 1 und 2 beschrieben (Schafisheim 1999 and Schafisheim 2000) untersuchten wir innerhalb direkt gesäten (NT) und konventionell gepflügten (CT) Kleinparzellen (12 m * 35 m) die räumliche Variation des Mineralstickstoffs des Bodens (N_{\min}) zu der Vegetationsbeginn, die räumliche Verteilung des Kornertrags, der Proteinkonzentration der Körner und der Stickstoffausnutzungs-Effizienz (NUE) in Winter-weizen sowie den Einfluss der N Düngung auf die räumliche Variation dieser Parameter (iii).

Dieser Versuch war als Randomized-complete-block-Design angelegt mit drei Wiederholungen für den Versuchsfaktor "Bodenbearbeitungs-System". Innerhalb jeder Parzelle waren die verschiedenen N-Düngungsmengen (1999: 0, 50, 100, 150, 200 kg N ha⁻¹, 2000: zusätzlich 250 kg N ha⁻¹) innerhalb vier so genannten Mikroplot-Gruppen (Mikroplotgrösse: 1.5 m * 1.5 m), die ungefähr 10 m Abstand voneinander hatten, zufällig angeordnet. Jedes Jahr wurden insgesamt 12 Mikroplot-Gruppen für jedes Bodenbearbeitungssystem angelegt.

N_{\min} zu Beginn der Vegetationsperiode, Kornertrag und NUE, gemittelt über alle N-Düngungsmengen, zeigten signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Mikroplotgruppen (=Positionen) innerhalb der NT- sowie CT-Parzellen. Der Kornertrag und der N-Gehalt der oberirdischen Pflanzenmasse waren nicht mit dem N_{\min} -Gehalt des Bodens vor der ersten N-Düngergabe korreliert. Verglichen mit CT führte NT gewöhnlich zu einer grösseren räumlichen Heterogenität von N_{\min} , Kornertrag und NUE. Hingegen wurde die Proteinkonzentration der Körner kaum von der Bodenbearbeitungsintensität beeinflusst und variierte in bescheidenem Ausmass zwischen den Positionen innerhalb der Kleinparzellen. Die Proteinkonzentration der Körner war hoch und schwankte zwischen 115 g kg⁻¹ bei 0 kg N ha⁻¹ bis 169 g kg⁻¹ bei 250 kg N ha⁻¹. Die kleinräumige Variabilität von Kornertrags, Proteinkonzentration, NUE und berechnetem N-Angebots des Bodens nahm in beiden Bodenbearbeitungssystemen mit zunehmender N-Düngungsmenge ab. Mit zunehmenden N-Mengen waren signifikante Zunahmen des Kornertrags und der Kornproteinkonzentrationen zu verzeichnen, wobei die NUE mit zunehmender N-Menge für NT als auch für CT leicht abnahm. Verglichen mit CT waren Kornertrag und NUE unter den feucht-gemässigten klimatischen Bedingungen des Schweizerischen Mittellandes in NT für N-Düngungsmengen unterhalb 150 kg N ha⁻¹ kleiner. Innerhalb der zweijährigen Studie war der Kornertrag bei CT stabiler als bei NT. Wegen einer reduzierten Bestandesdichte infolge eines strengen Winters im Jahre 1999 schwankte der Kornertrag bei NT zwischen den beiden Versuchsjahren stark.

Die insgesamt moderate räumliche Variation von N_{\min} , Kornertrag und NUE sprechen nicht für eine teilflächenspezifische N-Düngung innerhalb dieser untersuchten Kleinparzellen mit Ausnahme von einigen Stellen mit erhöhten Skelettgehalten, bei denen die Getreidepflanzen auf N-Mengen, die höher waren als 50 kg N ha⁻¹, nicht reagierten.

Wenn wir alle Experimente der drei Kapitel zusammenfassen, kommen wir zu folgender Schlussfolgerung: es ist ein nur mittleres Potential für eine teilflächenspezifische Düngung in den kleinen Feldern, die typisch für das Schweizerische Mittelland sind, vorhanden. Vermutlich ist dieses Potential in NT-Feldern höher einzustufen als in CT-Feldern, da diese Versuche gezeigt haben, dass in NT verglichen mit CT die kleinräumige Variabilität und die strukturelle Varianz im Oberboden (0 – 15 cm) dieser bodenchemischen Eigenschaften grösser war. Zudem wiesen diese bodenchemischen Parameter in NT verglichen mit CT

längere Reichweiten der räumlichen Abhängigkeit und stärkere räumliche Abhängigkeiten auf. Der zweite notwendige Schritt in Richtung "Precision Agriculture", das Überprüfen, ob eine zeitliche Konsistenz der räumlichen Muster der Boden- und Pflanzenparameter vorhanden ist, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden.