

Räumliche Variabilität von Mineralstickstoff im Boden

U. Schmidhalter¹, T. Alford¹, S. Hengeler² und J.J. Oerli¹

¹Institut für Pflanzenwissenschaften, ETHZ
²Landwirtschaftliche Schule Strickhof, Lindau

Zusammenfassung

Bodenuntersuchungen stellen räumliche und zeitliche Punktmessungen dar. Es wird vorausgesetzt, dass sie für den gewählten Standort repräsentativ sind. In dieser Arbeit wurde die räumliche Variabilität und die räumliche Abhängigkeit des Mineralstickstoffs untersucht und abgeklärt, wieviele Bodenproben bei N_{min} -Untersuchungen genommen werden müssen, damit eine sinnvolle Präzision erreicht wird.

In einem Rechteck von 40 auf 200 Metern wurden, netzartig in 10 Meter Abständen verteilt, je 100 Bodenproben in den Tiefen 0-30, 30-60 und 60-100 cm genommen und auf mineralischen Stickstoff untersucht. Die N_{min} -Werte der Tiefe 0-30 cm waren normal verteilt, diejenigen der Tiefen 30-60 cm und 60-100 cm waren lognormal verteilt. Die Variationskoeffizienten lagen zwischen 30-47%. Die Semivariogramme der drei untersuchten Tiefen waren wenig strukturiert und der Anteil der Variabilität, der auf räumliche Abhängigkeit zurückzuführen ist, klein. Bei 5, 10, 15 resp. 20 Probeentnahmen kann der N_{min} -Mittelwert der Tiefe 0-30 cm \pm 26%, 19%, 15 % resp. 13 % genau geschätzt werden, derjenige der Tiefe 30-60 cm \pm 37 %, 27 %, 22 % resp. 19 % und etwas weniger genau als letztere ist die Schätzung des N_{min} -Wertes der Tiefe 60-100 cm. Die Repräsentativität der Probeentnahme stellt nur einen Unsicherheitsfaktor bei der N_{min} -Bestimmung dar. Schätzfehler bei der Festlegung der Raumdicke und des Skelettgehaltes sowie analytische Fehler werden diskutiert und Vorschläge zur Verbesserung gemacht. N_{min} -Probeentnahmen stellen in einem frühen Vegetationszeitpunkt das beste Mittel zur Erreichung einer standortgerechten Düngung dar. Repräsentative Probeentnahmen bedingen die Entnahme von 10-15 Proben pro Parzelle. Eine Erhöhung der Probenzahl in den Tiefen 0-30 cm und 30-60 cm zu Lasten der Probenzahl der Tiefe 60-100 cm erhöht nicht nur die Genauigkeit, sondern stellt auch eine arbeitsstechnische Erleichterung bei der manuellen Entnahme dar.

1. Einleitung und Problemstellung

Ertrag, Qualität und Umwelt werden durch zu tief oder zu hoch bemessene Stickstoffgaben nachhaltiger beeinflusst als durch die P- und K-Düngung. In einem frühen Vegetationszeitpunkt lässt sich der pflanzenverfügbare Stickstoff nur durch Messung bestimmen, während in späteren Entwicklungsstadien die Beobachtung der Pflanzenbestände, einfache Pflanzenanalysen oder Kulturmassnahmen wie Düngungsfenster genauere Prognosen ermöglichen. Im jetzigen Zeitpunkt erlaubt die Modellierung der Stickstoffdynamik noch nicht eine praxistaugliche Umsetzung ihrer Resultate. Dies hängt damit zusammen, dass Transportvorgänge im Boden einigermassen brauchbar vorausgesagt werden können, die zeit- und tiefenabhängige Aufnahme der Pflanzen und insbesondere Transformationsvorgänge (Mineralisierung, Nitrifikation, Denitrifikation, Immobilisierung, Ammonifikation, Fixierung und Volatilisierung) nur ungenügend verstanden werden.

Die Bemessung der Stickstoffgaben wird somit aus dem geschätzten Bedarf der Pflanzen minus dem im Boden vorhandenen pflanzenverfügbaren Stickstoff (N_{min} -Methode) ermittelt.

Fehler in der Bemessung ergeben sich aufgrund ungenügender Repräsentativität der Probeentnahme, bei der Probebehandlung, bei Abweichungen von der angenommenen Lagerungsdichte (Molitor, 1982) sowie dem geschätzten Skelettgehalt des Bodens und aufgrund analytischer Fehler (Scharpf, 1977). Von verschiedenen Autoren wird der analytische Fehler als klein eingeschätzt (Richier et al., 1984).

In dieser Arbeit wird untersucht, wie viele Bodenproben bei N_{min} -Untersuchungen genommen werden müssen, damit eine sinnvolle Präzision erreicht werden kann. Dies ist besonders wichtig, da der zeitliche und organisatorische Aufwand viel höher ist als für andere Bodenuntersuchungen und die räumliche und zeitliche Variabilität von Mineralstickstoff hoch sein kann.

Die empfohlenen Bodeneinstiche variieren zwischen 5-12 pro Parzelle, praxisüblicher sind 5. Scharpf (1977) untersuchte den Einfluss steigender Stichprobenzahlen in einer Parzelle von 90 X 90 Metern. Die Mittelwerte der Mischproben aus 6, 8, 10, 12 und 16 Einstichen, die systematisch verteilt im

einem quadratischen Netz mit minimal 30 m Abstand entnommen wurden, ergaben 75, 99, 106, 110 und 106 kg N_{min}/ha. Scharpf (1977) folgert daraus, dass von 10 Einstichen an keine Veränderung des Mittelwertes mehr zu erwarten ist, woraus er die Empfehlung ableitet, aus einem repräsentativen Teilstück einer Parzelle 12 Einstiche zu nehmen. Es gibt relativ viele Untersuchungen, in denen aufgrund kleiner Stichprobenzahlen, die klein- oder grossräumlich entnommen wurden, Empfehlungen der notwendigen Stichprobenzahl gemacht werden.

Die räumliche Variabilität von Mineralstickstoff ist trotz früher Erkenntnis ihrer grossen Variabilität (Waynick, 1918; Prince, 1923) nicht ausreichend studiert worden (Meisinger, 1984). Es fehlen Untersuchungen, die auf hohen Stichprobenzahlen beruhen. Die räumliche Abhängigkeit des Stickstoffs ist bisher unzureichend untersucht worden.

Böden sind ihrer Natur nach heterogen. Jenny (1941) beobachtete, dass die gleichen Prozesse, die für die Bodenbildung verantwortlich sind, die Stickstoffverteilung bestimmen.

Die räumliche Variabilität von NO₃-N ist durch einen langsam zunehmenden Variationskoeffizienten (CV) gekennzeichnet, wenn die untersuchte Fläche zunimmt, und eine grosse klein-räumliche Komponente, die nicht gleichmässig über das Feld verteilt ist (Meisinger, 1984). Häufig findet man 50 % der Variabilität, die sich innerhalb einer Hektare findet, bereits in einigen Quadratmetern (Beckett and Webster, 1971). Die Kultivierung kann zu einer Erhöhung wie auch Reduktion der Variabilität führen. Bei stickstoffgedüngten Parzellen wurden Erhöhungen des Variationskoeffizienten um 100-150 % gegenüber nicht gedüngten Parzellen beobachtet (Biggar, 1978; Lindemann, 1986).

Hohe Variationskoeffizienten von Nitrat- und Ammoniumstickstoff sind von verschiedenen Autoren berichtet worden. Romero (1944) gibt CV-Werte von 27-80 % für NO₃-N und von 11-24 % für NH₄-N an. Reuss et al. (1977) untersuchten im Frühjahr 1974 und 1975 die NO₃-Gehalte in je 12 bewässerten Feldern. Sie entnahmen je eine Probe aus 0.37 ha grossen Quadraten, wobei die durchschnittliche Probenzahl 1974 23 und 1975 18.7 betrug. Um eine Präzision von ± 20 % des geometrischen Mittels zu erreichen, berechneten sie, dass 36 Einzelproben für eine repräsentative Mischprobe genommen werden müssten. Der 0- bis 60-cm NO₃-N CV-Wert betrug durchschnittlich 52 %. Meisinger

(1984) gibt für vier weitere Untersuchungen einen CV von 45% (33-109%) an. Für gängige Probenahmen von 10-20 Mischproben und einem Vertrauensintervall von 80% berechnete er, dass der Mittelwert mit ungefähr ± 20% bei 75 % der untersuchten Parzellen resp. mit ungefähr ± 25 % bei 90 % der untersuchten Flächen richtig geschätzt würde. Um den Wert auf ± 10 % des Mittelwertes auf 75 % der Fläche genau zu schätzen, wären 45 Proben erforderlich gewesen.

Probenahmeverfahren wurden häufig in einer Zeit entwickelt, als die Felder einheitlicher tiefe Stickstoffgehalte aufwiesen, oder sie wurden von P- und K-Probenahmeplänen abgeleitet. Es besteht daher die Notwendigkeit, effiziente Schemen zu entwickeln, um die mittleren NO₃-N-Gehalte genauer zu schätzen, zusammen mit einer Schätzung der räumlichen Variation des Gebietes (Meisinger, 1984).

2. Material und Methoden

Auf einer relativ ebenen Teilparzelle einer 2 Hektaren grossen Parzelle der landwirtschaftlichen Schule Strickhof (Lindau) wurden am 12. Dezember 1989 in einem Rechteck von 40 auf 200 Metern, netzartig in 10 Meter Abständen verteilt, je 100 Proben in den Tiefen 0-30, 30-60 und 60-100 cm entnommen. Die Auswahl einer Teilparzelle erlaube es Randeffekte zu vernachlässigen. Die Parzelle war zum Erntezeitpunkt brach, die Vorrucht war Silomais. Beim Boden handelt es sich um eine tiefgründige, basenreiche Braunerde. Die Dichte wurde einheitlich mit 1.2 g/cm³ angenommen. Der Skeletgehalt in den Tiefen 0-30 cm und 30-60 cm wurde auf 5 % geschätzt. Für die Tiefe 60-100 cm wurden 20 % Skeletanteil geschätzt.

Die Proben wurden unmittelbar nach der Entnahme tiefgefroren und erst kurz vor der Analyse aufgetaut und mit einem Sieb von 8 mm Maschenweite zusätzlich homogenisiert. Mit einer bei 105 °C während 48 Stunden getrockneten Teilprobe wurde der Wassergehalt bestimmt. Für die Analyse wurden 100 g feidfeuchter Boden mit 150 mL 0.05 M CaCl₂ versetzt und während einer Stunde über Kopf geschüttelt und abfiltriert. Das erste Aliquot wurde verworfen, um allfällig im Filter vorhandenes Ammonium zu entfernen.

Die Analyse erfolgte mit einer NH_3 -Elektrode (Orion model 95-12, Orion Research Inc.). Mit dem gewählten Messprinzip (Siegel, 1979) können NO_3 und NH_4 gleichzeitig gemessen werden. Die Reduktion von $\text{NO}_3\text{-N}$ in $\text{NH}_4\text{-N}$ erfolgte während 30 Minuten in einem Wasserbad bei 30°C mit Dewardas' Legierung. Die in Bechergläsern vorhandenen Proben wurden mit Parafilm abgedeckt. Die Elektrodenstellung betrug im Bereich von 0.1-10 ppm $\text{NH}_4\text{-N}$ 59.1 mV (22°C). Stichproben zeigten, dass der $\text{NH}_4\text{-N}$ in allen Fällen (2% des $\text{NO}_3\text{-N}$ war.

Die statistische Auswertung erfolgte mit Statgraphics (Statgraphics, Inc.) und geostatistische Parameter wurden mit Geopack (Yates and Yates, 1989) ausgewertet.

3. Ergebnisse und Diskussion

Die in den drei Tiefen 0-30, 30-60 und 60-100 cm sowie in der Gesamttiefe 0-100 cm gelundenen N_{min} -Werte sind in Abbildung 1 und 2 dargestellt.

Bodeneigenschaften sind nicht immer normal verteilt. Verschiedene Eigenschaften, wie beispielsweise die hydraulischen Leitfähigkeit, die Diffusivität oder Porenwassergeschwindigkeit, werden besser durch lognormale Verteilungen beschrieben. Eine einfache Methode zur Überprüfung der Normalverteilung ist ein Fraktildiagramm (Abb. 3). Die N_{min} -Werte der Tiefe 0-30 cm sind normalverteilt. Die Überprüfung der Güte der Anpassung mittels des Kolmogorov-Smirnov-Testes ergibt ein hohes Signifikanzniveau von 0.9945. Der berechnete Mittelwert unterscheidet sich nicht wesentlich vom Medianwert und dem Dichtemittel (Tab. 1). Abbildung 3 zeigt, dass die N_{min} -Werte der Tiefe 30-60 cm besser durch eine lognormale Verteilung (natürlicher Logarithmus) beschrieben werden. Dies gilt auch für die Tiefe 60-100 cm. Die Güte der Anpassung wird durch den Kolmogorov-Smirnov-Test bestätigt. Die Signifikanzniveau betragen 0.9998 resp. 0.9776 für die Tiefen 30-60 cm und 60-100 cm. Tabelle 1 zeigt die für diese Tiefen, basierend auf einer lognormalen Verteilung, berechneten Mittelwerte, Medianwerte und Dichtemittel. Die Annahme einer Normalverteilung führt in diesem Fall jedoch nur zu unwesentlich verschiedenen Werten.

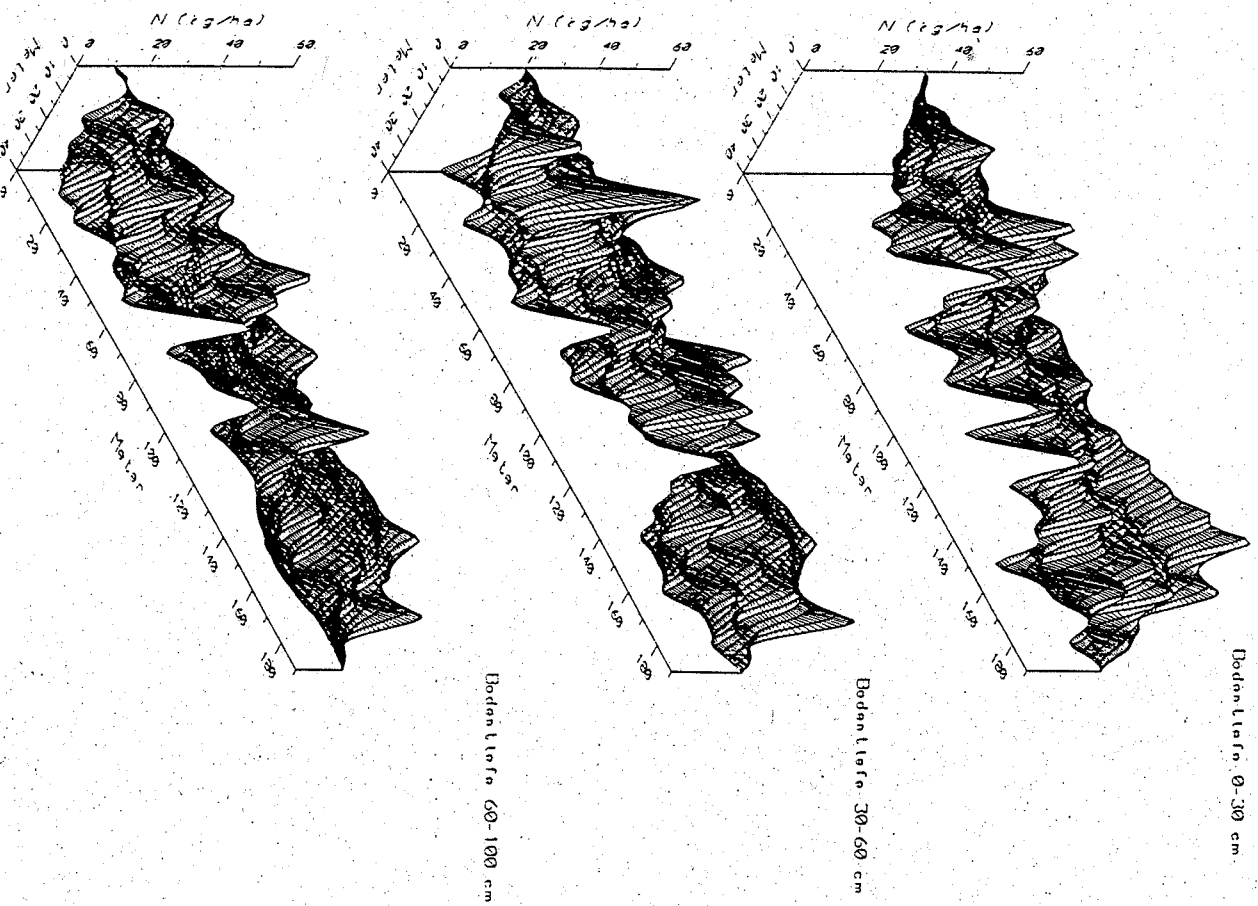


Abb. 1. N_{min} -Werte in den Bodentiefen 0-30 cm, 30-60 cm und 60-100 cm.

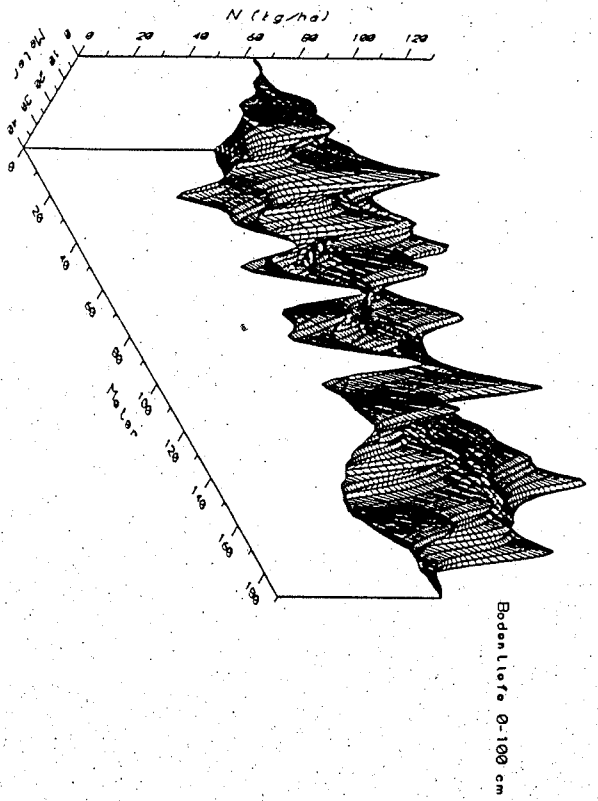


Abb. 2. N_{min} -Werte in der Bodentiefe 0-100 cm.

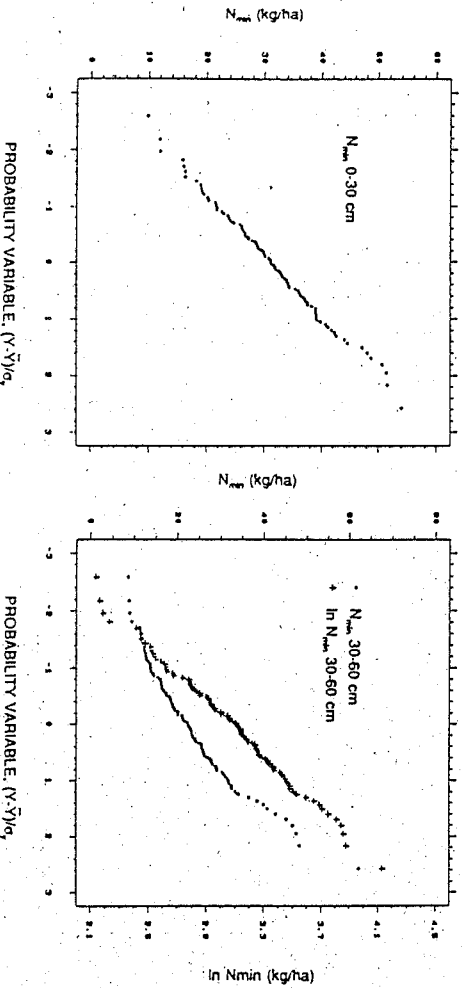


Abb. 3. Fraktildiagramme für die Bodentiefen 0-30 cm und 30-60 cm.

Die Variationskoeffizienten der drei untersuchten Tiefen liegen zwischen 30-47 %. Sie zeigen eine leichte Zunahme mit zunehmender Tiefe. Je höher der CV-Wert ist, desto mehr Proben müssen genommen werden, um eine verlässliche Aussage zu machen.

Tabelle 1. Mittelwert, Median, Dichtemittel und Variationskoeffizient der Bodentiefen 0-30, 30-60 und 60-100 cm.

	Bodentiefe (cm)		
	0-30	30-60	60-100
Mittelwert (kg/ha)	31.1	23.3	15.1
Median (kg/ha)	31.0	21.4	13.5
Dichtemittel (kg/ha)	30.8	18.0	10.7
Variationskoeffizient (%)	30.1	42.8	47.4

Das klassische Modell der Schätzung des Wertes einer Variablen beruht auf einer Normalverteilung der Residuen und setzt voraus, dass sie nicht korreliert sind. Die Hypothese der Unabhängigkeit der Residuen, welche oft fraglos allgemein akzeptiert wird, kann bei Eigenschaften in einem Kontinuum häufig nicht aufrechterhalten werden (Brun and Lopez, 1985). Je kleiner die Distanz zwischen Probenentnahmestandorten ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass die Residuen aufeinander bezogen sind. Wird dies nicht berücksichtigt, ergeben sich Überschätzungen der Streuung der Schätzwerte und damit zu hohe Probezahlen für eine gegebene Präzision. In der von Matheron (1963) entwickelten Theorie der regionalisierten Variablen wird die Korrelation der Residuen berücksichtigt. Die räumliche Abhängigkeit der zu messenden Eigenschaft wird mit einem Semi-Variogramm geschätzt, an das ein mathematisches Modell angepasst wird, das die Gewichte für die Berechnung der Schätzwerte mittels der Kriging-Technik liefert.

Die experimentellen Semivariogramme für die drei untersuchten Tiefen (Abb. 4) sind relativ wenig strukturiert und weisen einen grossen Nuggeffekt auf. Der Anteil der Variabilität, der auf räumliche Abhängigkeit zurückzuführen ist, ist klein. Der Wert geostatistischer Methoden ist somit für diese Eigenschaft beschränkt. In der Tiefe 30-60 cm und weniger ausgeprägt in 60-100 cm, findet sich bei einer Lagdistanz zwischen 110 und 170 Metern eine schwächere räumliche Abhängigkeit. Keine deutlichen räumlichen Abhängigkeiten finden sich in 0-30 cm Tiefe. Die Kultivierung hat in diesem Fall möglicherweise Unterschiede in den räumlichen Strukturen minimiert.

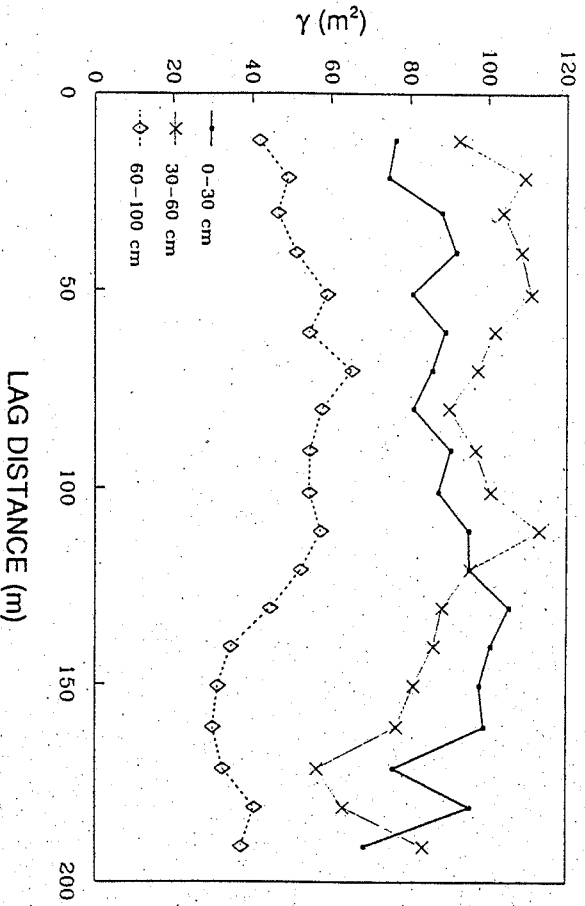


Abb. 4. Semivariogramme der Bodentiefen 0-30 cm, 30-60 cm und 60-100 cm.

Basierend auf diesen Vorergebnissen vereinfacht sich das Problem, die Probenanzahl zu bestimmen, um den Mittelwert mit einer vorgegebenen Genauigkeit zu schätzen. Die Proben können als unabhängig betrachtet werden und die Probenzahl ist genügend gross, so dass das zentrale Grenzwerttheorem gilt. Für die erste Schicht ist die Normalverteilung nachgewiesen, für die zweite

und dritte Schicht kann der Mittelwert und die Standardabweichung aufgrund der hohen Probenzahl genügend genau approximiert werden.

Die Anzahl Proben, die genommen werden müssen, um innerhalb d Einheiten des Mittelwerts zu sein, berechnet sich nach:

$$N = x_a^2 \sigma^2 / d^2$$

wo σ die Standardabweichung ist, x_a die Standardnormalverteilung, d gibt an wie genau (beispielsweise in % des Mittelwertes oder als Absolutwert) der Mittelwert geschätzt wird. Abbildung 5 zeigt wie genau der N_{min} -Wert in Prozent des Mittelwertes bei einer bestimmten Probenzahl bestimmt werden kann. In der gleichen Abbildung sind diese Angaben für den untersuchten Standort in kg N/ha umgerechnet worden. Bei 5, 10, 15 resp. 20 Probenahmen kann der Mittelwert der Tiefe 0-30 cm $\pm 26\%$, 19 %, 15 % resp. 13 % genau geschätzt werden. Dies entspricht umgerechnet ± 8.2 , 5.6, 4.7 resp. 4.1 kg N/ha. Bei der Bodentiefe 30-60 cm betragen die entsprechenden Werte $\pm 37\%$, 27 %, 22 % resp. 19 %, und umgerechnet ± 8.7 , 6.1, 5 resp. 4.4 kg N/ha und Schicht. Für die Bodentiefe 60-100 cm betragen die entsprechenden Werte $\pm 42\%$, 29 %, 24 % resp. 21 %, bzw. 6.3, 4.4, 3.3 und 3.1 kg N/ha. Für die untersuchte Parzelle kann der Mittelwert von 69.5 kg N_{min} somit bei 5 Einstichen mit ± 23.2 kg resp. bei 15 Einstichen mit ± 11.6 kg genau bestimmt werden. Bei diesen Probegrössen wird der Mittelwert mit $\pm 33\%$ resp. $\pm 17\%$ genau bestimmt. Bei N_{min} -Empfehlungen von beispielsweise 120 kg N/ha bei Winterweizen resp. 220 kg N/ha bei Mais, sind Abweichungen oberhalb dieser Richtwerte (≥ 120 resp. 220 kg N) resp. bei einem sehr tiefen Versorgungsniveau (≤ 20 kg N) nicht relevant. Genauere Aussagen sind nur im Zwischenbereich erforderlich.

Welche Genauigkeit ist anstrebenswert? Die Repräsentativität der Proben stellt nur einen Faktor bei der Festlegung der N-Düngung dar. In die N_{min} -Bestimmung fliessen weitere Unsicherheitsfaktoren ein. Für die Umrechnung der analysierten Werte muss die Raumdichte des Bodens und der Skeletgehalt des Bodens geschätzt werden. Wie verhalten sich die Unsicherheiten dieser Grössen im Vergleich mit derjenigen der Probenanzahl und der analytischen Messungsgenauigkeit?

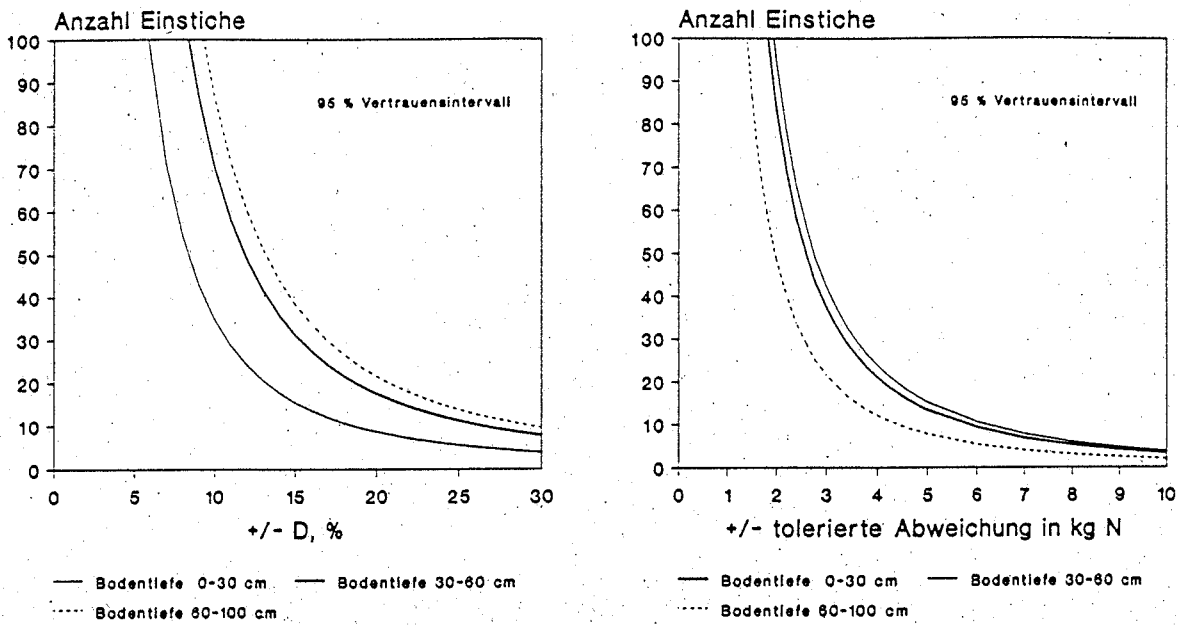


Abb. 5. Beziehung zwischen der Anzahl Proben und der zu erwartenden Genauigkeit ausgedrückt in Prozent des Mittelwertes des untersuchten Standortes (linke Darstellung) bzw. in kg N (rechte Darstellung).

Von verschiedenen Autoren werden die eigentlichen Messfehler als klein eingeschätzt. Der Variationskoeffizient der N_{min} -Analyse ist mit 5 % klein im Verhältnis zum räumlichen N_{min} -Variationskoeffizienten, der in dieser Arbeit 30-47 % betrug. Eine bessere Aussage resultiert nicht aus einer geringfügigen analytischen Verbesserung, sondern aus einer repräsentativeren Probe, die auf einer höheren Stichprobenzahl beruht. Die Unsicherheiten, die bei der Schätzung der Raumdichte resp. des Skeletthaltiges resultieren, sind ebenfalls deutlich höher als analytisch bedingte Fehler. Die Raumdichten landwirtschaftlicher Böden liegen zwischen 0.8-1.6 g/cm^3 . Diese Grösse kann auch durch erfahrene Leute höchstens auf $\pm 0.1 g/cm^3$ genau geschätzt werden. Bei einer Abweichung in dieser Grössenordnung ergibt sich bei einer durchschnittlichen Raumdichte von 1.2 g/cm^3 ein Fehler von $\pm 8\%$. Die Abweichungen sind bei kleineren Raumdichten grösser als bei hohen. Zwischen 1-1.5 g/cm^3 betragen sie 10 - 7 %. Bei höheren Anteilen Skeletts im Boden ist es äusserst schwierig, diese Grösse richtig zu schätzen. Ein Fehler von $\pm 5-10\%$ ist im oberen Bereich der erreichbaren Genauigkeit. Fehler in der Schätzung dieser Grössen können sich aufheben. Mit welchen Fehlern im ungünstigeren Fall jedoch bei einer relativ bescheidenen Abweichung von den wahren Werten zu rechnen ist, wird nachfolgend veranschaulicht. Die Raumdichte eines Bodens betrage durchschnittlich 1.3 g/cm^3 , der Skeletthalt 10 %. Wird die Raumdichte auf 1.2 g/cm^3 und der Skeletthalt auf 15 % eingeschätzt, wird der N_{min} -Wert ca. 13 % zu tief bestimmt, was eine entsprechende Mehrdüngung zur Folge hätte. Nimmt man als obere Fehlergrenze beim gleichen Beispiel eine Unterschätzung der Raumdichte um 0.2 g/cm^3 und eine Überschätzung des Skeletthaltiges um 10 % an, so verdoppelt sich der Fehler auf 26 %.

Der Gesamtfehler in der Schätzung der Raumdichte und des Skeletthaltiges dürfte etwa 10-20 % betragen. Diese Werte liegen in der Grössenordnung der Fehler, die sich bei der Entnahme von 10-20 Proben in 0-30 cm Tiefe ergeben können. Werden weniger als 10 Proben pro Parzelle genommen, so sind die durch eine zu geringe Probenzahl bedingten Fehler höher als diejenigen, die sich durch eine fehlerhafte Einschätzung der Raumdichte und des Skeletthaltiges ergeben. Diese Aussage gilt im untersuchten Beispiel noch mehr für die tieferen Schichten von 30-60 cm und 60-100 cm. Diese Fehler wirken sich um so stärker aus, je höher der N_{min} -Wert einer Schicht ist.

Je später N_{\min} -Proben im Verlauf der Vegetation genommen werden, um so wichtiger wird die oberste Schicht, in der die Mineralisierung am stärksten ist, so dass trotz einer tieferen Variabilität als in den unteren Schichten, infolge der höheren N_{\min} -Werte ein grösserer Fehler in der Bestimmung des verfügbaren Mineralstickstoffs resultiert. Die zeitliche Variabilität ist in dieser Arbeit nicht berücksichtigt worden. Wehrmann et al. (1988) geben für die Mineralisierung während der Vegetationsperiode Werte von 32-185 kg N an. In Lössböden im südlichen Niedersachsen wurden vom April bis August durchschnittlich 70-100 kg mineralisiert. Je nach Standort müsste somit der zeitlichen Variabilität als fehlerbestimmendem Faktor Rechnung getragen werden. Im Rahmen der N_{\min} -Methode ist die erste Zeit nach Vegetationsbeginn entscheidend. Im Gegensatz zur Mineralisierung, die auf dem gleichen Standort je nach Witterung sehr variabel sein kann, kann die Raumdichte des Bodens mit Ausnahme des Bearbeitungshorizontes als konstant angenommen werden. Dies gilt auch für den Skeletgehalt des Bodens. Der Variationskoeffizient für die Raumdichte ist tief. Warrick und Nielsen (1980) geben für drei Untersuchungen übereinstimmend einen Wert von 7 % an, d.h. dass mit sehr wenigen Proben der Mittelwert genügend genau geschätzt werden kann. Gunaa (1978) gibt dafür die sehr tiefe Probenzahl von 2 an. Unter mitteleuropäischen Bedingungen ist die Variabilität der Bodendichte wahrscheinlich höher als in den von Warrick und Nielsen erwähnten Untersuchungen aus den Vereinigten Staaten. Trotzdem sollte es möglich sein, basierend auf vorhandener Information resp. durch selektive Beprobung ausgewählter Bodentypen, mit einem vergleichsweise geringen Aufwand eine wesentliche Verbesserung bei der Ermittlung der N_{\min} -Werte zu erreichen. Analoges gilt für den Skeletgehalt der Böden. Bei tiefgründigen Böden kann eine bedeutende Aufnahme von Stickstoff aus grösserer Tiefe erfolgen. Trotzdem sieht fest, dass der grösste Teil aus den oberen Schichten aufgenommen wird, diese somit wichtiger sind als tieferliegende Schichten. Somit sollte die Beprobungsintensität vor allem in diesen Schichten hoch sein. Eine Erhöhung der Probenzahl der obersten zwei Schichten zu Lasten der Probenzahl der untersten Schicht erhöht nicht nur die Genauigkeit, sondern stellt auch eine wesentliche arbeitsökonomische Erleichterung dar. Der bereits jetzt zur Verfügung stehende Datensatz sollte es ermöglichen, einfache Zusammenhänge zwischen den N_{\min} -Werten in den tieferen Schichten und den oberen herzustellen bzw. auch Bedingungen zu

finden, unter denen diese nicht gelten. Bei der untersuchten Parzelle besteht ein sehr enger Zusammenhang zwischen dem N_{\min} -Wert der 0-60 cm Tiefe und der 0-100 cm Tiefe. Die Regressionsgleichung lautet $N_{\min 0-100} = 0.47 (2.22) + 1.27 (0.04) N_{\min 0-60}$ ($R^2 = 92.1$).

Der Nutzen einer standortgerechteren N-Düngung, welcher mit der N_{\min} -Methode angestrebt wird, ist nicht in erster Linie bei den eigentlichen Aufwendungen für die N-Düngung zu sehen. Der ertragswirksame Effekt ist demgegenüber ein Vielfaches höher und stellt mit der angestrebten Minimierung der Belastung der Umwelt die eigentliche Zielgrösse dar. Die N_{\min} -Methode ist in einem frühen Vegetationszeitpunkt momentan das beste Mittel zur Erreichung dieses Zieles. Aufgrund dieser Arbeit zeigt sich, dass bei einer Erhöhung der Einstiche von 5 auf 15 der Mittelwert 15% genauer bestimmt werden kann. Bei der untersuchten Parzelle, deren Mittelwert 69.5 kg N_{\min} beträgt, ergibt sich eine verbesserte Schätzung des Mittelwertes von 13 kg N_{\min} /ha. Die Erhöhung der Probenzahl kann ohne Einbusse der Genauigkeit zu Lasten der Tiefe 60-100 cm erfolgen. Weitere Untersuchungen werden zeigen müssen, ob eventuell nicht sogar ganz, basierend auf genügend genauen Regressionsmodellen, eine Beschränkung auf die Untersuchungstiefe 0-60 cm vorgenommen werden kann.

6. Literatur

- Beckett, P.H.T., and R. Webster, 1971. Soil variability: a review. *Soils Fert.* 34, 1-15.
- Biggar, J.W., 1978. Spatial variability of nitrogen in soils. In: Nielsen, D.R. and MacDonald, J.G. (eds). *Nitrogen behavior in field soils*. Academic Press, New York, Vol. 1, pp. 201-211.
- Braun, T., and C. Lopez, 1985. Some applications of regionalized variables theory to soil sampling problems. In: Gomez, A. et al. (eds.), *Sampling problems for the chemical analysis of sludge, soils and plants*. Elsevier Applied Science Publishers, London and New York.

- Gumaa, G.S., 1978. Spatial variability of in situ available water. Ph.D. Dissertation. The University of Ariz., Tucson, Arizona.
- Jenny, H., 1941. Factors of soil formation. McGraw-Hill Book Company, New York and London.
- Lindemann, Y., 1986. Contribution à l'étude statistique des répartitions et à la modélisation de la dynamique de l'azote nitrrique dans le sol. Thèse doctorat ès sciences. Université Paris Sud, Centre d'Orsay.
- Matheron, G., 1963. Principles of geostatistics. Econ. Geology 58, 1246-1266.
- Meisinger, J.J., 1984. Evaluating plant-available nitrogen in soil-crop systems. In: Hauck, R.D. (ed). Nitrogen in crop production. ASSA-CSSA-SSSA, Madison, WI, pp. 391-416.
- Molitor, H.-D., 1982. Der Mineralstickstoffgehalt von Löss- und Geschiebden in Niedersachsen - Faktoren und Bedeutung für die Ernährung der Pflanze. Diss., Hannover.
- Prince, A.L., 1923. Variability of nitrates and total nitrogen in soils. Soil Sci. 15, 395-406.
- Reuss, J.O., P.N. Soltanpour, and A.E. Ludwick, 1977. Sampling distribution of nitrates in irrigated fields. Agr. J. 69, 588-592.
- Richter, J., H. Nordmeyer und K.-C. Kersebaum, 1984. Zur Aussagegicherheit der N_{min} -Methode. Z. Acker- und Pflanzenbau 153, 285-296.
- Romero, S.A., 1944. A study of soil variability at Mount Pleasant. M.S. Thesis, Cornell Univ., Ithaca, New York.
- Scharpf, H.C. 1977. Der Mineralstickstoffgehalt des Bodens als Massstab für den Stickstoffdüngungsbedarf. Dissertation, Hannover.
- Siegel, R.S., 1979. Determination of nitrate and exchangeable ammonium in soil extracts by an ammonia electrode. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 943-947.
- Statgraphics, 1987. Statgraphics user's guide. Statistical graphics system by statistical graphics corporation, Inc., Rockville, Maryland.

- Waynick, D.D., 1918. Variability in soils and its significance to past and future soil investigations. I. A statistical study of nitrification in soils. Univ. Calif. Berkeley Publ. Agri. Sci. 4:121-139.
- Warrick, A.W., and D.R. Nielsen. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D. (ed). Applications of soil physics, pp. 319-376.
- Wehrmann, J., H.-C. Scharpf, and H. Kuhlmann. 1988. The N_{min} -method -an aid to improve nitrogen efficiency in plant production. In: Jenkinson, D.S. and Smith, K.A. (eds). Nitrogen efficiency in agricultural soils. Elsevier Applied Science, London and New York, pp. 38-45.
- Yates, S.R., and M.V. Yates. 1989. Geostatistics for Waste Management. GEOPACK (Version 1.0b), Geostatistical Software System.