

ABSCHÄTZUNGSMÖGLICHKEITEN DER
ERNÄHRUNGSBEDINGUNGEN AUF DEN KIEFERN-
STANDORTEN AN HAND EINER KOMPLEXEN AUSWERTUNG
DER NADELANALYSENDATEN

Z. Prusinkiewicz

N. Copernicus Universität, Institut für Biologie,
Lehrstuhl für Bodenkunde, 87-100 Toruń, Sienkiewicza 30,
Polen

EINLEITUNG

Die übliche Beurteilungsweise der Ernährungsbedingungen in Kiefernbeständen mittels einer chemischen Nadelanalyse besteht bekanntlich, seit WEHRMANN'S (1959) grundlegenden Arbeiten, aus folgenden Verfahren:

1. Sammlung am Ende einer Vegetationsperiode von Nadelproben aus entsprechenden Kronenteilen einer Anzahl (gewöhnlich etwa 20) von Probebäumen (herrschende bzw. mitherrschende Bäume);
2. Bereitung einer Mischprobe von gesammelten Nadeln;
3. Mengenbestimmung von einzelnen Nährelementen in der Nadelmischprobe;
4. Umrechnung der Resultate in entsprechende Masseinheiten - Trockenmassenprozente oder (seltener) Milligramm pro 100 Nadelpaare;
5. Abschätzung der Ernährungsbedingungen des untersuchten Bestandes auf Grund eines Vergleichs der Analysendaten mit den der Fachliteratur entnommenen Grenzwerten.

Dieses Verfahren erweckt nun folgende Bedenken:

- a. Die allgemeine Brauchbarkeit von Grenzwerten, die bei verschiedenen Autoren zu finden sind, ist mindestens sehr problematisch: wenn diese an einem gewissen Standort für eine Kiefernpopulation von bestimmter Provenienz und Alter gewonnen worden sind, dann brauchen sie nicht unbedingt ihren Vergleichswert für andere Verhältnisse beizubehalten;
- b. Die meistens in Trockenmassenprozenten ausgedrückten Analyseergebnisse sind als Ernährungszustandsindikatoren zu wenig empfindlich, weil sie den Verdünnungs- und Steenbjergerffekten sehr stark unterliegen;
- c. In der Literatur gibt es bisher nur sehr wenige Vergleichszahlen für die pro 100 Nadelpaare umgerechneten Nährstoffgehalte. Für diese Kennwerte gelten übrigens die im Punkt a. genannten Vorbehalte;
- d. Bei der Verwendung von Grenzwerten bleiben die Verhältnisse zwischen den einzelnen Nährelementen gewöhnlich unberücksichtigt, was eine richtige Beurteilung der günstig-

sten Düngergaben, die dem untersuchten Bestand eine optimale Versorgung mit einzelnen Nährstoffen garantieren sollen, sehr stark erschwert.

Vor 25 Jahren haben LEYTON und ARMSON (1955) ihre Versuchsergebnisse veröffentlicht, in denen die Nadeldiagnose in solcher Weise vorgeführt wurde, daß sich die Verwendung von Grenzzahlen erübrigte. Es wurden nämlich für 10 Probestämmchen eines Kiefernjungbestandes die chemischen Nadelanalysen für jede Pflanze getrennt durchgeführt. Die Ergebnisse wurden nachher in Gewichtsprozente umgerechnet und mit Hilfe der multiplen Regressionsanalyse der Biomassenproduktion einzelner Bäumchen gegenübergestellt. Die Resultate dieses Versuches mußten jedoch nicht ganz befriedigend ausgefallen sein, weil die Autoren auf eine weitere Entwicklung ihrer Konzeption verzichtet haben.

Meiner Meinung nach war jedoch der Kern dieser Idee gesund und ich glaube, daß es uns gelungen ist einen Fortschritt auf diesem Wege zu erzielen.

METHODISCHE VORAUSSETZUNGEN

Der Grundgedanke unseres Vorschlages stützt sich auf die Feststellung, daß sogar in Waldbeständen, die auf einem scheinbar sehr einheitlichen Boden wachsen, die Ernährung einzelner Bäume ganz verschieden sein kann. Die individuelle Variabilität der einzelnen biometrischen Merkmale jedes Baumes im Bestand ist also nur teilweise genetisch und biosozial bedingt, und muß im gewissen Maße auch von den lokalen Ernährungsverhältnissen abhängen. Diese bestimmen in erster Linie die Entwicklung von Assimilationsorganen und damit auch den laufenden Zuwachs der Bäume. Wenn man also die N, P, K usw.-Gehalte in den einzelnen Nadelproben von z.B. 20 bis 30 Bäumen analysiert hat und außerdem über die Vermessungsdaten der Nadellängen bzw. Nadelgewichte in diesen Proben verfügt, dann kann die Abhängigkeit der Nadelgröße von einzelnen Nährelementen im untersuchten Bestand in Form einer multiplen Regression ausgedrückt werden. Unsere Untersuchungen zeigten dabei, daß sich zu diesem Zwecke die in Milligramm pro 100 Nadelpaare ausgedrückten Nadelanalysenergebnisse besser eignen, als diejenigen in Trockenmassenprozenten (PRUSINKIEWICZ et al., 1974).

Die Anwendung eines entsprechenden Computerprogrammes erlaubt uns die Regressionsrechnungen so durchzuführen, daß die wenig beitragenden Nährelemente aus der Schlußformel verschwinden und nur die wesentlichen von ihnen in der Gleichung bleiben. Gleichzeitig zeigt uns der Determinationskoeffizient (R^2), wie hoch der Prozentanteil von sämtlichen, in der Gleichung gebliebenen Nährelementen zur Bildung der Assimilationsorgane im untersuchten Bestande ist. Aus unseren bisherigen Untersuchungen geht hervor, daß der Anteil des Nährelementeangebotes an der Assimilationsorganentwicklung von Kiefernbeständen auf schwach podsolierten Böden aus Sander- und Talsanden in Mittelpolen um 90% variiert.

Weitere Angaben über die Nährstoffversorgung des untersuchten Kiefernbestandes sind den Regressionskoeffizienten aus der Regressionsgleichung zu entnehmen. Im allgemeinen können die Koeffizienten mit einem Plus- oder Minus- Vorzeichen bei den einzelnen Nährelementen vorkommen. Die positiven zeugen von einer mangelhaften Versorgung, die negativen dagegen - umgekehrt, von einem relativen Überschuß des betreffenden Elements. Die Zahlengröße der Koeffizienten informiert uns darüberhinaus über das Ausmaß des Defizits bzw. Überschusses.

In den von uns bisher untersuchten Böden haben sich oft Stickstoff, Kalium und Magnesium als mangelhaft, dagegen Kalzium, Phosphor und Aluminium als relativ überschüssig erwiesen. Die toxische Wirkung des Aluminiums auf die Pflanzen ist allgemein bekannt. Im Falle eines Kalzium- und Phosphorüberschusses handelt es sich dagegen sicherlich nur um eine relative Übermenge, weil die beiden Elemente in den untersuchten Böden nur in spärlichen Mengen vorkommen. Das Wachstum der Pflanzen hängt bekanntlich nicht nur von den absoluten Mengen der einzelnen Elemente ab, sondern vielmehr von den abgewogenen gegenseitigen Mengenverhältnissen, in welchen sie den Pflanzen zur Verfügung stehen und durch die Wurzeln aufgenommen werden.

Bei allen Vorteilen des geschilderten Verfahrens darf jedoch nicht vergessen werden, daß die Brauchbarkeit der multiplen Regressionsanalyse für die richtige Steuerung der Ernährungsverhältnisse in den Waldstandorten oft durch eine starke Wechselwirkung zwischen den unabhängigen Variablen (Nährelementen) in den Kiefernadeln begrenzt werden kann. Oft kann man nämlich von vornherein nicht voraussagen, ob der durch die Zugabe eines mangelhaften Elements hervorgerufene Nadel- bzw. Baumzuwachs durch die synergistischen Wechselwirkungen mit anderen Nährstoffen eine Verstärkung, oder aber durch Ionenantagonismus eine Abschwächung erleiden wird. Es gibt jedoch eine Methode, welche uns erlaubt, die unmittelbaren Einwirkungen jedes untersuchten Nährelements von den mittelbaren abzutrennen.

Es handelt sich um die sogenannte Pfadkoeffizientenmethode. Diese Koeffizienten sind Zahlen, die uns über den Anteil der durch eine einzige Ursache hervorgerufenen Standardabweichungen in der gesamten Standardabweichung einer komplexbedingten Folge Auskunft geben. Darüberhinaus ist der Pfadkoeffizient immer eine richtungsbedingte Zahl, d.h. ihr Wert hängt davon ab, welche von zwei untersuchten Variablen als die Ursache, und welche als die Folge anerkannt worden ist (WRIGHT, 1934).

ERLÄUTERUNGSBEISPIEL

Das oben Gesagte möchte ich an einem Beispiel erläutern. Im Jahre 1976 haben wir Nadelanalysen an 20 Probeebäumen in einem etwa 70-jährigen, schlecht wüchsigen Kiefernbestand (*Cladonio-Pinetum*) auf einem einst durch Streunutzung stark degradierten Sandboden in der Tucheler Heide durchgeführt.

Multiple Regressionsanalyse

Die multiple Regressionsanalyse (Tabelle 1) hat für den Einfluß sämtlicher Nährelemente auf das Nadel Trockengewicht folgende Gleichung ergeben:

$$Y_U = 0,450 + 41,8 N + 49,4 K - 576,2 Fe + 81,2 Mg - 13,7 Ca - 20,0 P - 24,8 Al \quad (100 R^2 = 94,41 \%)$$

Das Plus-Vorzeichen bei Stickstoff, Kalium und Magnesium deutet auf einen Mangel an diesen Nährelementen. Die übrigen Elemente haben ein Minus-Vorzeichen - befinden sich also in einem relativen Überschuß.

In der Regressionsgleichung sind die Elemente entsprechend ihrer Bedeutung für das Nadel Trockengewicht geordnet. Aus der Analyse der Determinationskoeffizienten geht hervor, daß im untersuchten Bestand Stickstoff und Kalium besonders stark zum Nadelgewicht beitragen; die übrigen Elemente können vernachlässigt werden, ohne den Determinationskoeffizienten wesentlich zu verkleinern. Die abgekürzte Gleichung lautet:

$$Y'_U = 0,518 + 43,3 N + 40,1 K \quad (100 R^2 = 93,45 \%)$$

Der Anteil der beiden Nährelemente an der Trockenmassenbildung der Kiefernadeln beträgt in diesem Falle über 93%.

Auf Grund dieser Feststellung wurde ein Teil des untersuchten Kiefernbestandes im Frühjahr 1977 mit Harnstoff (etwa 90 kg N/ha) und mit Kalisalz (etwa 100 kg K/ha) gedüngt. Ende Oktober 1978 wurden je 20 Probestämme auf den gedüngten - und Kontrollflächen geschlagen, die Nadelproben entnommen, und der laufende Massenzuwachs des Bestandes ermittelt.

Die jetzt erhaltenen Resultate der Nadelanalysen sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Einfachheitshalber sind nur die Mittelwerte angegeben. Die mittlere Nadellänge ist von 53,8 auf 67,8 mm - und das Trockengewicht der 100 Nadelpaare von 3,27 auf 4,67 g gestiegen.

Der laufende Massenzuwachs des Kiefernbestandes betrug auf der Kontrollfläche nur 3,64 m³/ha und auf der gedüngten Fläche - 6,47 m³/ha; der erreichte Mehrzuwachs macht also 2,83 m³/ha aus.

Die neue Regressionsgleichung für die gedüngte Fläche lautet jetzt (Tabelle 1):

$$Y_D = 0,590 + 26,2 N + 615,3 Mg + 19,4 K - 33,2 Ca + 286,1 Al + 203,2 Fe + 2,7 P \quad (100 R^2 = 96,53 \%)$$

Der Vergleich der Regressionsgleichungen vor und nach der Düngung läßt erkennen, daß sich infolge der Düngung das Stickstoff- und Kaliangebot auf dem untersuchten Standort erheblich verbesserte, obwohl der Bedarf des Bestandes an diese Nährelemente immer noch nicht voll gedeckt ist. Aus der Gleichung sieht man auch, daß die angewandte Düngung die Magnesiumversorgung des Bestandes sehr stark verschlechtert hat, sodaß man dieses Element jetzt zu den wichtigsten, den Zuwachs am stärksten begrenzenden Faktoren, rechnen muß. Auch beim

Tabelle 1: Multiple Regressionsanalyse. Einfluß sämtlicher Nährelemente auf das Nadel Trockengewicht (Y) in einem Kiefernbestand (Cladonio-Pinetum)

Vor der Düngung (1976)	
$Y_U = +0,450 + 41,8 N + 49,4 K - 576,2 Fe + 81,2 Mg - 13,7 Ca -$	
$- 20,0 P - 24,8 Al$	$(100 R^2 = 94,41\%)$
$Y'_U = +0,518 + 43,3 N + 40,1 K$	$(100 R^2 = 93,45\%)$
Kontrolle (1978)	
$Y_K = +0,490 + 52,3 N + 33,7 K - 346,5 Fe - 25,4 Ca + 167,8 Al +$	
$+ 3,2 Mg - 4,3 P$	$(100 R^2 = 97,72\%)$
$Y'_K = +0,547 + 50,8 N + 26,9 K$	$(100 R^2 = 97,51\%)$
NK-Düngung (1978)	
$Y_D = +0,590 + 26,2 N + 615,3 Mg + 19,4 K - 33,2 Ca +$	
$+ 286,1 Al + 203,2 Fe + 2,7 P$	$(100 R^2 = 96,53\%)$

Tabelle 2: Ergebnisse der Nadelanalysen (Oktober 1978) in einem Kiefernbestand (Cladonio-Pinetum) in der Tucheler Heide. Mittelwerte (nach der NK-Düngung, 1977)

	% TS		mg in 100 Nadelpaaren	
	Kontrolle	Gedüngt	Kontrolle	Gedüngt
N	1,319 \pm 0,025	1.671 \pm 0,040	43,74 \pm 2,85	78,86 \pm 5,79
P	0,161 \pm 0,004	0,184 \pm 0,005	5,34 \pm 0,39	8,70 \pm 0,68
K	0,571 \pm 0,019	0,669 \pm 0,020	18,66 \pm 1,24	31,10 \pm 1,96
Ca	0,165 \pm 0,008	0,175 \pm 0,013	5,50 \pm 0,46	8,45 \pm 1,00
Mg	0,081 \pm 0,003	0,049 \pm 0,002	2,66 \pm 0,19	2,31 \pm 0,18
Fe	0,006 \pm 0,000	0,004 \pm 0,000	0,21 \pm 0,02	0,19 \pm 0,02
Al	0,017 \pm 0,001	0,015 \pm 0,001	0,56 \pm 0,03	0,71 \pm 0,07
Nadellänge (mm)			53,8 \pm 1,7	67,8 \pm 2,3
Trockengew.der 100 Nadelpaare (g)			3,27 \pm 0,17	4,67 \pm 0,29
Laufender Massenzuwachs des Bestandes (m ³ /ha/Jahr)			3,64	6,47

Phosphor, der vor der Düngung einen relativen Überschuß aufwies, ist jetzt ein kleiner Mangel feststellbar.

Pfadkoeffizientanalyse

Die Einwirkung jedes beliebigen Elements auf die Größe der Assimilationsorgane (Nadeltrockenmasse) können wir jetzt mit der Pfadkoeffizientanalyse ermitteln. Vergleichen wir z.B. das Magnesium und dessen Einwirkung auf gedüngter- und Kontrollfläche.

T a b e l l e 3: Magnesiumeinwirkung auf die Nadeltrockenmasse (Pfadkoeffizientanalyse)

	Kontrolle	NK - Düngung
Unmittelbare Mg-Wirkung	+0,003	+0,398
Zusammenwirkung mit N	+0,662	+0,452
P	-0,011	+0,009
K	+0,173	+0,093
Ca	-0,051	-0,100
Fe	-0,020	+0,012
Al	+0,012	+0,051
Insgesamt	$r_1 = +0,768^{xx}$	$r_2 = +0,915^{xx}$

Wie man aus Tabelle 3 ersehen kann, ist der unmittelbare Einfluß des Magnesiums auf das Nadelgewicht auf der gedüngten Fläche vielmals größer als auf der Kontrolle. Dieser Einfluß ist durch die Zusammenwirkung mit anderen Elementen - vor allem mit Stickstoff - bedeutend verstärkt worden, unterliegt aber einer kleinen Abschwächung durch die Zusammenwirkung mit Kalium.

Die algebraische Summe aller Einwirkungen ist gleich dem einfachen Korrelationskoeffizienten zwischen dem Magnesiumgehalt (in mg pro 100 Nadelpaare) und dem Nadeltrockengewicht. Obwohl beide Koeffizienten hochsignifikant sind, ist jedoch dieser auf der gedüngten Fläche bedeutend höher, als jener auf der Kontrolle.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Auf Grund einer zusammenfassenden Auswertung der Regressions- und Pfadkoeffizientanalyse ist die Feststellung gemacht worden, daß eine weitere Steigerung des Baumzuwachses im untersuchten Standort durchaus möglich ist, erfordert aber nicht nur Stickstoff- und Kalidüngung, sondern auch eine Magnesium-

und, in kleineren Mengen, auch Phosphorzufuhr, um eine gute Zuwachsleistung zu erzielen.

Zum Schluß meiner Mitteilung möchte ich nochmals hervorheben, daß die in geschilderter Weise durchgeführten und ausgewerteten Nadelanalysen viele wichtige Kenntnisse über die Ernährungsbedingungen im untersuchten Kiefernstandort liefern, die sonst eine sehr komplizierte und umfangreiche Feldversuchsanlage, und einen Vergleich mit unsicheren Grenzzahlen benötigen würden.

LITERATUR

- LEYTON, L. und ARMSON, K., 1955: Mineral Composition of the Foliage in Relation to the Growth of Scots Pine. *Forest Science* 1, 210-218.
- PRUSINKIEWICZ, Z., BIALY, K., und CHRAPKOWSKI, B., 1974: Chemical Composition and Biometric Features of Assimilation Organs as Indices of Soil Conditions, Mineral Nutrition and Fertilization Needs of Pine Forests. (in Polish, incl. English summary), *Roczniki Gleboznawcze* 25, 223-236.
- WEHRMANN, J., 1959: Methodische Untersuchungen zur Durchführung von Nadelanalysen in Kiefernbeständen. *Forstwiss.Cbl.* 78, 77-79.
- WRIGHT, S., 1934: The Method of Path Coefficients. *Annals of Math. Stat.* 5, 161-215.

SUMMARY

It is possible to obtain a large amount of important informations on the nutrient status of a given habitat by subjecting the results of foliar analysis taken separately from 20 - 30 trees representing all diameter classes to an adequate set of statistical methods.

Analysis of multiple regression puts the particular elements in order of their current influence on the development of the assimilating organs (or biomass production) and points out the deficit elements and those in relative excess. Analysis of the path coefficients, on the other hand, defines the direct effect of each of the nutrient elements under study on the development of the assimilating organs and the indirect effects induced by interaction among the remaining elements.

Joint consideration of all informations obtained by the statistical methods used helps assess the nutrition intensity of the tree stand under study and predict the probability of response to the fertilizer applied.

KEW WORDS: pine habitats, nutrition status, foliar analysis, multiple regression, path coefficients.

Phosphor, der vor der Düngung einen relativen Überschuß aufwies, ist jetzt ein kleiner Mangel feststellbar.

Pfadkoeffizientanalyse

Die Einwirkung jedes beliebigen Elements auf die Größe der Assimilationsorgane (Nadeltrockenmasse) können wir jetzt mit der Pfadkoeffizientanalyse ermitteln. Vergleichen wir z.B. das Magnesium und dessen Einwirkung auf gedüngter- und Kontrollfläche.

T a b e l l e 3: Magnesieeinwirkung auf die Nadeltrockenmasse (Pfadkoeffizientanalyse)

	Kontrolle	NK - Düngung
Unmittelbare Mg-Wirkung	+0,003	+0,398
Zusammenwirkung mit N	+0,662	+0,452
P	-0,011	+0,009
K	+0,173	+0,093
Ca	-0,051	-0,100
Fe	-0,020	+0,012
Al	+0,012	+0,051
Insgesamt	$r_1 = +0,768^{xx}$	$r_2 = +0,915^{xx}$

Wie man aus Tabelle 3 ersehen kann, ist der unmittelbare Einfluß des Magnesiums auf das Nadelgewicht auf der gedüngten Fläche vielmals größer als auf der Kontrolle. Dieser Einfluß ist durch die Zusammenwirkung mit anderen Elementen - vor allem mit Stickstoff - bedeutend verstärkt worden, unterliegt aber einer kleinen Abschwächung durch die Zusammenwirkung mit Kalium.

Die algebraische Summe aller Einwirkungen ist gleich dem einfachen Korrelationskoeffizienten zwischen dem Magnesiumgehalt (in mg pro 100 Nadelpaare) und dem Nadeltrockengewicht. Obwohl beide Koeffizienten hochsignifikant sind, ist jedoch dieser auf der gedüngten Fläche bedeutend höher, als jener auf der Kontrolle.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Auf Grund einer zusammenfassenden Auswertung der Regressions- und Pfadkoeffizientanalyse ist die Feststellung gemacht worden, daß eine weitere Steigerung des Baumzuwachses im untersuchten Standort durchaus möglich ist, erfordert aber nicht nur Stickstoff- und Kalidüngung, sondern auch eine Magnesium-

und, in kleineren Mengen, auch Phosphorzufuhr, um eine gute Zuwachsleistung zu erzielen.

Zum Schluß meiner Mitteilung möchte ich nochmals hervorheben, daß die in geschilderter Weise durchgeführten und ausgewerteten Nadelanalysen viele wichtige Kenntnisse über die Ernährungsbedingungen im untersuchten Kiefernstandort liefern, die sonst eine sehr komplizierte und umfangreiche Feldversuchsanlage, und einen Vergleich mit unsicheren Grenzzahlen benötigen würden.

LITERATUR

LEYTON, L. und ARMSON, K., 1955: Mineral Composition of the Foliage in Relation to the Growth of Scots Pine. Forest Science 1, 210-218.

PRUSINKIEWICZ, Z., BIALY, K., und CHRAPKOWSKI, B., 1974: Chemical Composition and Biometric Features of Assimilation Organs as Indices of Soil Conditions, Mineral Nutrition and Fertilization Needs of Pine Forests. (in Polish, incl. English summary), Roczniki Gleboznawcze 25, 223-236.

WEHRMANN, J., 1959: Methodische Untersuchungen zur Durchführung von Nadelanalysen in Kiefernbeständen. Forstwiss.Cbl. 78, 77-79.

WRIGHT, S., 1934: The Method of Path Coefficients. Annals of Math. Stat. 5, 161-215.

SUMMARY

It is possible to obtain a large amount of important informations on the nutrient status of a given habitat by subjecting the results of foliar analysis taken separately from 20 - 30 trees representing all diameter classes to an adequate set of statistical methods.

Analysis of multiple regression puts the particular elements in order of their current influence on the development of the assimilating organs (or biomass production) and points out the deficit elements and those in relative excess. Analysis of the path coefficients, on the other hand, defines the direct effect of each of the nutrient elements under study on the development of the assimilating organs and the indirect effects induced by interaction among the remaining elements.

Joint consideration of all informations obtained by the statistical methods used helps assess the nutrition intensity of the tree stand under study and predict the probability of response to the fertilizer applied.

KEW WORDS: pine habitats, nutrition status, foliar analysis, multiple regression, path coefficients.