

BERICHTE
FREIBURGER FORSTLICHE FORSCHUNG

HEFT 20

Geostatistische Analyse der Struktur von Waldbeständen

am Beispiel
ausgewählter Bannwälder
in Baden-Württemberg
Jochen Weber

FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT
BADEN-WÜRTTEMBERG
ABT. BOTANIK UND STANDORTSKUNDE

FREIBURG, APRIL 2000

CIP-Kurztitelaufnahme der
Deutschen Bibliothek

Weber, Jochen: Geostatistische Analyse der Struktur von Waldbeständen am Beispiel ausgewählter
Bannwälder in Baden-Württemberg. Jochen Weber [Hrsg.: Forstwissenschaftliche Fakultät der Universität
Freiburg und Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg]. - Freiburg (Breisgau): FVA,
2000 (Freiburger Forstliche Forschung; Berichte Heft 20) Zugl.: Freiburg (Breisgau), Univ. Diss 1999

ISSN 1436-1566

Die Herausgeber:

Forstwissenschaftliche Fakultät der
Universität Freiburg und
Forstliche Versuchs- und
Forschungsanstalt Baden-Württemberg

Autor:

Diplom - Forstwirt Jochen Weber Verein für Standortkunde und Forstpflanzenzüchtung im Auftrag der FVA,
Abteilung Botanik und Standortkunde

Umschlaggestaltung:

Bernhard Kunkler Design, Freiburg

Bestellung an:

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt
Baden-Württemberg
Wonnhaldestr. 4
79100 Freiburg

Tel. 0761/4018-0 Fax 0761/4018-333

e-mail: poststelle@fva.bwl.de internet: <http://www.forst.uni-freiburg.de/fva>

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung vorbehalten.

Gedruckt auf 100 % chlorfrei gebleichtem Papier

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	
1.1. Problemstellung	1
1.2. Naturwaldreservate als Forschungsobjekte	4
1.3. Ziele der Arbeit	4
1.4. Aufbau der Arbeit	5
1.5. Unbearbeitete themenrelevante Fragestellungen	5
1.5.1. Strukturdiversität und Angewandte Ökologie	5
1.5.2. Vergleich der Untersuchungsgebiete mit außereuropäischen Urwäldern	6
1.5.3. Aufnahmemethodik	6
2. Untersuchungsgebiete und Inventurmethode	7
2.1. Kurzbeschreibung der Untersuchungsgebiete	7
2.1.1. Wuchsgebiet Oberrheinisches Tiefland	7
2.1.2. Wuchsgebiet Schwarzwald	8
2.1.3. Wuchsgebiet Neckarland	9
2.2. Inventurmethode	9
2.3. Waldkundliche Kennwerte der Untersuchungsflächen	12
2.3.1. BW Bechtaler Wald und Vergleichsfläche	12
2.3.2. BW Napf	13
2.3.3. BW Conventwald	13
2.3.4. BW Wilder See - Homisgrinde und Vergleichsfläche	13
2.3.5. BW Hoher Ochsenkopf und Vergleichsfläche	14
2.3.6. BW Sommerberg und Vergleichsfläche	14
2.4. Verwendete Software	14
3. Waldstruktur als diskrete Informationsquelle	15
3. 1. Waldstruktur	15
3.1.1. Differenzierung	16
3.1.2. Störungen	16
3.1.3. Forstliche Bewirtschaftung	17
3.2. Waldstruktur als Indikator	17
3.3. Räumliche Variation der Waldstruktur	18

3.4. Strukturhierarchie	19
3.5. Operationalisierung des Begriffes Waldstruktur	20
3.5.1. Baumarten	20
3.5.2. Vertikalschichtung	21
3.5.3. Zustand (lebend/tot)	21
3.6. Quantifizierung von Informationsquellen	21
3.7. Entropie und Strukturdiversität	23
3.7. 1. Teildiversitäten $H'(A)$, $H'(V)$ und $H'(Z)$	25
3.7.2. Evenness der Teildiversitäten $E'(A)$, $E'(V)$ und $E'(Z)$	25
3.7.3. Gesamte Strukturdiversität $MAVZ)$	26
3.7.4. Evenness der Strukturdiversität $EMVZ)$	27
3.7.5. Abhängigkeiten der Teildiversitäten	27
3.8. Schätzung der Teildiversitäten	28
3.9. Aufnahme der Waldstruktur	30
3.9. 1. Fehlerquellen	30
3.9.2. Heterogenität und Stichprobenfläche	30
3.10. Diversität der Waldstruktur am Beispiel der Bannwälder Conventwald und Sommerberg.....	31
3.10.1. Diversität der Waldstruktur und Stichprobenfläche	31
3.10.2. Folgeaufnahmen im BW Conventwald	38
3.10.3. Vergleich verschiedener Waldgesellschaften	40
3.11. Vergleich Bannwald und Wirtschaftswald	43
3.12. Kopplung der Teilsysteme - Vergleich der Untersuchungsgebiete	44
3.13. Beziehungen zwischen den Strukturdiversitäten von Teilsystemen	46
3.14. Diskussion	46
3.14.1. Allgemeine Bewertung des Verfahrens	46
3.14.2. Addition von Teildiversitäten	48
3.14.3. Schätzung der Diversität	48
3.14.4. Die Kategorisierung	50
3.14.5. Vergleich Bannwald - Vergleichsfläche	51
4. Räumliche Variabilität der Strukturdiversität	52
4.1. Räumliche Autokorrelation	52
4.1.1. DefinitionerräumlichenAutokorrelation	52
4.1.2. Analyse der räumlichen Autokorrelation	52

4.2. Geostatistische Analyse der Waldstruktur	57
4.2.1. Regionalisierung der Strukturdiversität	57
4.2.2. Stationarität	57
4.2.3. Modellierung von empirischen Semivariogrammen	60
4.2.4. Regularisierung	65
4.2.5. Kriging	65
4.2.6. Koregionalisierung der Teildiversitäten	68
4.3. Praktische Semivariogrammanalyse	70
4.3.1. Wahl der Distanzklassen.....	70
4.3.2. Räumliche Anomalien	71
4.3.3. Trend-Kontamination	72
4.3.4. Validierung von Semivariogrammen	73
4.3.5. Angewandtes Kriging	73
4.3.6. Zusammenfassung: Komponenten der Waldstruktur und ihre Manifestation im Semivariogramm	74
4.4. Geostatistische Analyse der Untersuchungsgebiete	76
4.4.1. Räumliche Anomalien	76
4.4.2. Trends	77
4.4.3. Anisotropie	77
4.4.4. Semivariogramm-Analyse der Untersuchungsgebiete	78
4.4.4.1. Allgemeines	78
4.4.4.2. Reichweiten	79
4.4.4.3. Schwellenwerte	79
4.4.5. Kreuzvalidierung von Semivariogrammen	83
4.5. Analyse der y-Diversität von Wäldern	85
4.5.1. Strukturdiversität von größeren Waldbeständen	85
4.5.2. Berechnung der y-Diversität	86
4.5.3. Simulation des räumlichen Zufallsprozesses	90
4.5.3.1. Ziele einer Simulation	90
4.5.3.2. Prozedur der bedingten Simulation	90
4.5.3.3. Simulation der Landschaftsdiversität WL	92
4.5.4. Schätzung der Verteilung bestimmter Strukturelemente oder Häufigkeiten	93
4.6. Diskussion	93
4.6.1. Räumliche Autokorrelation	93

4.6.2. Räumliche Anomalien	94
4.6.3. Geostatistische Analyse	95
4.6.3.1. Allgemeine Bewertung des Verfahrens	95
4.6.3.2. Modellierung von empirischen Semivariogrammen	95
4.6.3.3. Reichweite der Autokorrelogramme und Semivariogramme	96
4.6.3.4. Loch-Effekt	96
4.6.4. Abhängigkeit der Diversität der Teilsysteme und Koregionalisierung	97
4.6.5. Abweichungen vom Gauss'schen Zufallsprozeß	98
4.6.6. Flächengeometrie	99
4.6.7. Simulation der räumlichen Verteilung der Strukturdiversität	100
5. Diskussion und Ausblick	101
5.1. Bewertung des Verfahrens	101
5.2. Strukturdiversität als Zielgröße	101
5.3. Voraussetzungen an Datenmaterial und Software	103
5.4. Ausblick	104
6. Zusammenfassung	105
7. Literatur	108
8. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	117
8.1. Tabellen	117
8.2. Abbildungen.....	118
9. Anhang	121
9.1. Trend- und anomalienbereinigte Semivariogramme mit Modellierung und Anzahl von Wertepaaren	121
9.2. Anhang 2: Kovariogramme der Teildiversitäten mit Anzahl der Wertepaare	127

Vorwort

Die Idee zu dieser Arbeit entstand im Rahmen der Naturwaldforschung an der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Abt. Botanik und Standortkunde. Dabei entstand der Wunsch zu einer umfassenden Analyse der ‚Waldstruktur‘.

Das Gelingen dieser Arbeit wäre ohne die Mitwirkung einer Vielzahl von Personen nicht möglich gewesen. Mein besonderer Dank gilt insbesondere:

- Herrn Prof. Dr. Dr. Dieter R. Pelz (Abt. Forstl. Biometrie, Univ. Freiburg) für die vielfältige fachliche und organisatorische Unterstützung,
- Herrn Prof. Dr. Albert Reif (Waldbau-Institut, Univ. Freiburg) für die Übernahme des Koreferates und die fachliche Diskussion,
- den Herren Dr. Eberhard Aldinger, Dr. Winfried Bücking und Ralph Kärcher von der Forstlichen Versuchs- u. Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Abt. Botanik und Standortkunde, für die interessanten Diskussionen und vielfältigen Anregungen, die weitreichende organisatorische und technische Hilfe sowie für die Überlassung der Inventurdaten,
- den Herren Gerhard Mühlhäußer und Jürgen Bayer (Verein f. Forstl. Standortkunde und Forstpfl.züchtung) für die organisatorische und technische Unterstützung - nicht zuletzt in allen Fragen rund um's GIS,
- Herrn Ord.Univ.Prof. Dr. Rudolf Dutter (Inst. Statistik, Wahrscheinlichkeitstheorie u. Versicherungsmath. TU Wien) für die fachlichen Diskussionen sowie die freundliche Aufnahme und organisatorische Unterstützung während eines Aufenthaltes 1998 in Wien im Rahmen eines COST E4 - Stipendiums sowie für die Erlaubnis zur Benutzung von GEOSAN,
- den Herren Dr. Peter Meyer (Niedersächsische Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt), Dr. Eric Zenner, Helmar Binder, Paul Lübbers, Patrick Obergföll, Roberto Scoz und Oliver Rau (Abt. Forstl. Biometrie, Univ. Freiburg) für konstruktive Anregungen,

den Herren Hans Heinrich Kegler und Marcus Lingenfelder (beide Verein f. Forstl. Standortkunde u. Forstpfl.züchtung) für die kritische Durchsicht der Arbeit und Herrn Dr. HyoChang Nam für den Hardware-Support.

6. Zusammenfassung

Die natürliche Entwicklung von Waldstrukturen ist das Untersuchungsobjekt der Naturwaldforschung. Mittels Dauerbeobachtungen, die sich vor allem auf terrestrische Inventuren stützen, wird diese Entwicklung beschrieben. In der vorliegenden Arbeit wird eine Methode vorgestellt, wie Waldstruktur auf verschiedenen Ebenen operationalisiert und auf Basis von Stichprobendesigns quantifiziert bzw. geschätzt werden kann. Das Verfahren wurde anhand von Inventurdaten verschiedener Bannwälder und Vergleichsflächen im Wirtschaftswald in BadenWürttemberg untersucht.

Waldstruktur kann als eine hierarchische Organisation begriffen werden, die von strukturierenden Prozessen, welche auf verschiedenen Ebenen wirken, kontrolliert wird. Die kleinste Einheit der Waldstruktur, die α -Struktur, orientiert sich als kleinste funktionelle Einheit an der Kronenschirmfläche eines Baumes im Altbestand. Die Struktur entlang eines standörtlichen Gradienten (β -Struktur) oder eines größeren Waldbestandes bzw. einer Landschaft (γ -Struktur) setzt sich aus dem räumlichen Nach- bzw. Nebeneinander der kleinsten Struktureinheiten zusammen. Daneben existiert eine zeitliche Dimension der Waldstruktur, die sich aus dem zeitlichen Nacheinander ergibt.

Die Struktur von Waldbeständen kann als diskrete Informationsquelle begriffen werden, die mit Methoden der Informationstheorie beschrieben werden kann. Einzelbäume sind die Elemente der α -Struktur. Aus der Zusammensetzung dieser Strukturelemente berechnet sich der Informationsgehalt bzw. die Entropie von Waldstrukturen. Die Entropie eines Systems kann auch als dessen Diversität, in diesem Zusammenhang als Strukturdiversität, verstanden werden. Als wichtigste Teilsysteme der α -Struktur werden die Kategorien Baumart, vertikale Höenschichtung und Zustand (lebend/tot) definiert. Für jedes dieser Teilsysteme kann eine Diversität bestimmt werden, wobei sich für das Gesamtsystem eine gesamte Strukturdiversität als Summe der bedingten Teildiversitäten der Teilsysteme ergibt.

Sowohl die Schätzung der Teil- als auch der gesamten Strukturdiversität mittels Stichproben führt zu einer systematischen Unterschätzung der wahren Strukturdiversität, da die Anzahl der Strukturelemente stets unterschätzt wird. Es läßt sich eine Strukturelementakkumulationskurve definieren, in der der Zusammenhang zwischen der Anzahl von Strukturelementen und der Stichprobenfläche zum Ausdruck gebracht wird. Die Schätzung der Strukturdiversität ist deswegen in hohem Maße von der Stichprobenfläche abhängig.

Die mittlere α -Strukturdiversität des Gesamtsystems der Bannwälder ist in der Regel signifikant höher als die der entsprechenden Vergleichsflächen im Wirtschaftswald. Dies gilt nicht für den Bannwald Hoher Ochsenkopf, dessen mittlere Strukturdiversität signifikant niedriger ist als

auf der Vergleichsfläche im Wirtschaftswald. Dies kann einerseits durch die extensive Bewirtschaftung der Vergleichsfläche als auch die fortgeschrittene Auflösung des Bannwaldbestandes infolge einer Borkenkäferkalamität erklärt werden. Die Beschreibung von Waldstruktur als Summe der Diversität von Teilsystemen ist ein flexibles Verfahren, das sich beliebig auf andere Teilsysteme erweitern läßt.

Die α -Strukturdiversität von Stichprobenflächen auf einem systematischen Raster war in den meisten Untersuchungsgebieten räumlich autokorreliert. Die räumliche Autokorrelation wurde mittels Autokorrelogrammen berechnet, die die Abhängigkeit von Distanzklasse zu dem Grad der Autokorrelation darstellen. Die Reichweite sowie der Grad der Autokorrelation waren sowohl zwischen den Bannwäldern als auch zwischen Bann- und Wirtschaftswäldern sehr unterschiedlich. Es ergaben sich Reichweiten zwischen 50 - 600 m. Mittels Permutationen konnte die Hypothese der zufälligen Verteilung der α -Strukturdiversität verworfen werden.

Die Geostatistik untersucht den räumlichen Zufallsprozeß, als dessen Ergebnis die räumliche Verteilung von Merkmalen zustande kommt. In bezug auf Waldstrukturen wurden verschiedene Teilprozesse definiert. Wichtige Teilprozesse wurden mittels dem Instrument des Semivariogramms beschrieben und modelliert. Das Semivariogramm beschreibt die Variation eines Merkmals in Abhängigkeit zur Entfernung zwischen den Orten, wo es erhoben wurde. Ein räumlicher Prozeß kann im Semivariogramm mittels seiner maximalen Reichweite und seines Schwellenwertes - das ist die Varianz bei Erreichen der Reichweite - beschrieben werden.

Räumliche Anomalien sind Komponenten des Prozesses der Waldstruktur. Als lokale Anomalien können sie im Semivariogramm erkannt werden, als punktuelle Anomalie äußern sie sich in einer erhöhten Nugget-Varianz. Punktuelle Anomalien können im Semivariogramm andere Strukturen überlagern und wurden deswegen entfernt.

In manchen Untersuchungsgebieten konnte kein strukturierender Teil eines Prozesses erkannt werden. Dies äußert sich im Semivariogramm durch einen reinen Nugget-Effekt, d.h. es gibt keinen Zusammenhang zwischen räumlicher Entfernung und der Varianz (Bannwald Franzosenbusch, Vergleichsfläche Bechtaler Wald). In den Bannwäldern Napf, Wilder See - Hornisgrinde Hoher Ochsenkopf und Sommerberg konnten geschachtelte Strukturen erkannt werden, d.h. es überlagern sich räumliche Prozesse mit unterschiedlichen Reichweiten. Das Semivariogramm der Diversität von Teilsystemen der Bannwälder Bechtaler Wald, Napf, Conventwald, Wilder See - Hornisgrinde sowie der Vergleichsflächen Wilder See - Hornisgrinde und Hoher Ochsenkopf zeigte einen Locheffekt mit einer periodischen Schwankung um den Schwellenwert.

Vergleiche zwischen den Untersuchungsbeständen wurden durch die unterschiedliche Rasterdichte der Stichproben erschwert, da sich ein Prozeß mit einer geringeren Reichweite als der Rasterabstand nicht im Semivariogramm widerspiegeln kann.

Mittels Kriging wurde die räumliche Verteilung der α -Strukturdiversität auf Grundlage des Semivariogramms geschätzt. Aus dem Ergebnis der Schätzung wurden diskrete Polygone mit jeweils ähnlicher Diversität berechnet. Aus der Verteilung der Polygone wurde eine β -Strukturdiversität abgeleitet. Räumliche Simulationen, denen dasselbe räumliche Modell wie der Kriging-Schätzung zugrunde lagen, analysierten die potentielle Fluktuation des räumlichen Zufallsprozesses. Für die Simulationen ergab sich gegenüber der Kriging-Schätzung eine sehr hohe β -Strukturdiversität. Während die Simulationen die höchstmögliche Fluktuation der α -Strukturdiversität und damit die höchste β -Strukturdiversität erzeugen, ergibt sich aufgrund der glättenden Eigenschaften des Krigings eine β -Strukturdiversität, die unterhalb der tatsächlichen liegt. Es ergab sich bei allen Untersuchungsflächen mit Ausnahme des BW Hoher Ochsenkopf die höhere β -Diversität auf der Bannwaldfläche.

Die Erreichung einer hohen Strukturdiversität als allgemeine Zielgröße für forstwirtschaftliches Handeln ist problematisch, da immer nur bestimmte zeitliche und räumliche Dimensionen der Strukturdiversität berücksichtigt werden können. Zweckmäßiger erscheint die Verwendung der Indizes als Maßstab zur Beurteilung der natürlichen Entwicklung bzw. der Auswirkung waldbaulicher Maßnahmen auf die Diversität der Waldstruktur als Veränderungsgröße.