

**Analyse und Reproduktion räumlicher Bestandesstrukturen.  
Methodische Überlegungen am Beispiel niedersächsischer  
Buchen-Lärchen-Mischbestände\***

*Analysis and Reproduction of Spatial Stand Structures.  
Methodic Thoughts on the basis of Mixed Beech-Larch Stands in  
Lower Saxony\**

Von HANS PRETZSCH

**Schlagwörter:** Buchen-Lärchen-Mischbestand; Baumverteilungsmuster; Methode des nächsten Nachbarn ; Aggregationsindex; Segregationsindex; Strukturgenerator.

**Key words:** beech-larch mixed stand; spatial pattern; nearest neighbour method; aggregation index; segregation index; stand structure generator.

**Zusammenfassung**

Im ersten Teil der Untersuchung werden mit dem Aggregationsindex  $R$  von Clark und Evans zur Indizierung regelmäßiger, zufälliger und geklumpfter Baumverteilungen und dem Segregationsmaß  $S$  von Pielou zur Beschreibung der Durchmischung zweier Arten zwei Maßzahlen zur Charakterisierung von Baumverteilungsmustern vorgestellt und auf 53 niedersächsischen Buchen-Lärchen-Versuchsflächen, die der Untersuchung zugrunde liegen, erprobt. Der zweite Teil der Untersuchung zielt auf die Erschließung der Strukturinformation, die in gutachtlichen Befunden der Forsteinrichtung steckt und auf ihre Nutzbarmachung für waldwachstumskundliche Zustandsdiagnosen und Entwicklungsprognosen. Mit dem Strukturgenerator STRUGEN wird ein erster pragmatischer Lösungsweg dafür vorgezeichnet, wie aus großflächig bekannten, verbalen Strukturbefunden, wie Truppmischung, Gruppenmischung usw., rechnerisch räumliche Bestandesstrukturen erzeugt werden können, die in ihren dynamik- und stabilitätsprägenden Strukturmerkmalen gut mit den wirklichen Beständen korrespondieren. Grundbausteine für die Generierung des Vertei-

---

\* Vortrag auf der Jahrestagung der Sektion Biometrie und Informatik des Verbandes Forstlicher Forschungsanstalten vom 8.–10. September 1993 in Freising.

lungsmusters sind ein zweidimensionaler homogener P o i s s o n -Prozeß und ein Satz zweidimensionaler Verteilungsfunktionen die Mischungsform und Durchmischung von Haupt- und Mischbaumart steuern. Abstandsfunktionen gewährleisten artspezifische Mindestabstände zwischen Nachbarbäumen. Die erzeugten Muster stellen sich als Realisation aus einer Kombination von einem inhomogenen P o i s s o n -Prozeß (der die Mischungseinheiten erzeugt) und einem hard-core-Prozeß (der Mindestabstände zwischen Nachbarn sicherstellt) dar. Der Strukturgenerator wird für Mischbestände aus Buche und Lärche konstruiert und anhand der 53 Buchen-Lärchen-Mischbestände validiert. Indem er gutachtliche Strukturmerkmale in Startwerte für Wuchsmodelle umsetzt, könnte STRUGEN den Weg dazu ebnen, abstandsabhängige Einzelbaummodelle für Rein- und Mischbestände großflächig einzusetzen.

### Summary

The first part of the investigation draws special attention to the spatial stand structure as a central dynamic and stability-determining stand characteristic and introduces methods of pattern identification. With the aggregation index  $R$  from Clark and Evans (1954) for the identification of univariate patterns and the segregation index  $S$  from Pielou (1977) for the analysis of bivariate patterns two nearest neighbour methods for the identification of stand structures are introduced. They are used for the structural characterization of 53 experimental plots of beech-larch mixed stands in Lower Saxony which constitute the data base of this investigation. In the second part of the investigation the stand structure generator STRUGEN is developed to model and reproduce spatial stand structures. The basis for generating stand structure is a two-dimensional homogeneous P o i s s o n -process and a set of two-dimensional distribution functions which regulate the kind and extend of the mixture of main and associated tree species. Moreover secures a distance function the minimum distance between competing neighbouring trees. Consequently the produced pattern is the result of the combination of an inhomogeneous P o i s s o n -process (which generates the units of the mixture) and a hard-core process (which secures minimum distances between the neighbours). The generator STRUGEN is constructed and validated by the 53 mixed stands of beech and larch. The generator allows to generate initial values and stand structures for distance-dependent single-tree models from estimated verbal stand characteristics. In this way STRUGEN allows first pragmatic steps towards the utilization of information on nominal or categorical scale for the state diagnosis and growth prognosis in forest yield science.

### 1. Räumliche Struktur als dynamik- und stabilitätsprägendes Bestandesmerkmal

Die konventionelle Beschreibung von Waldbeständen anhand von ertragskundlichen Mittel- oder Summenwerten vernachlässigt die dreidimensionale Bestandesstruktur und läßt damit das geradezu wichtigste Bestandescharakteristikum außer acht. Denn die räumliche Struktur eines Waldbestandes, sein horizontaler und vertikaler Aufbau zu einem gegebenen Zeitpunkt, prägen in entscheidendem Maße die weitere Bestandesentwicklung; das gilt prinzipiell für alle Waldaufbauformen, insbesondere aber für den angestrebten Wald von morgen: für strukturreiche Mischbestände mit komplizierten inner- und zwischenartlichen Konkurrenzprozessen (Assmann, 1953/1954; von Gadow, 1993).

Buchen-Lärchen-Mischbestände, deren Struktur Gegenstand dieser Untersuchung ist, können sich auch bei gleichen ertragskundlichen Bestandesmittel- und Bestandessummenwerten und gleichen Häufigkeitsfrequenzen der Baumdimensionen bei einer Einzelbaum- oder Reihemischung von Buche und Lärche grundlegend anders entwickeln als bei Gruppen-, Horst- oder Streifenmischung. Die Wuchsüberlegenheit der Lärche in der Jugend und der Buche in höherem Alter kann bei intensiver einzelbaum- oder reihenweiser Mischung die Entwicklung der jeweils unterlegenen Baumart erheblich verlangsamen, während beide Baumarten bei einer gruppen- oder horstweisen Mischung gleichmäßiger, weil weniger spannungsreich und kleinflächig unter innerartlicher Konkurrenz erwachsen (Dippel, 1988; Kramer, 1987).

Neben den i. e. Sinne waldwachstumskundlichen Prozessen bestimmt die räumliche Bestandesstruktur aber vor allem auch die Habitat- und Artendiversität im Bestand und damit seine ökologische Stabilität. Bisher sind die Kenntnisse über den Zusammenhang zwischen Bestandesstruktur, Artenvielfalt und ökologischer Stabilität zwar noch sehr lückenhaft (Altenkirch, 1982; Arbeitskreis forstliche Landespflege, 1984; Blab, 1986; Ellenberg et al., 1985). Es besteht aber Übereinstimmung darin, daß mit Zunahme der horizontalen und vertikalen Strukturierung eines Waldes in der Regel auch die Vielfalt der darin vorkommenden Tier- und Pflanzenarten ansteigt und die zwischenartlichen Verknüpfungen, die zur ökologischen Stabilität beitragen, zunehmen (Haber, 1982).

Die folgenden Überlegungen zur Analyse, Abbildung und Reproduktion der räumlichen Struktur von Mischbeständen haben also nicht nur eine ertragskundliche Dimension, sondern sie berühren auch einen wesentlichen Aspekt der ökologischen Stabilität von Waldbeständen.

Bei der Erfassung und Identifikation von Bestandesstrukturen können wir uns zwar auf ein weitentwickeltes Repertoire von Zählquadrat- und Abstandsverfahren stützen, über die Pielou, 1975 und 1977, Ripley, 1977 und 1981 und Upton und Fingleton, 1985 und 1989 eine gute Übersicht vermitteln. Alle dort beschriebenen Methoden der Strukturidentifikation bauen aber auf aufwendigen Baumverteilungskarten und Baumabstandsmessungen auf, setzen also detaillierte Strukturinformationen voraus, die wohl von Versuchflächen, nicht aber in der Praxis vorliegen. Um auch die Strukturinformation zu erschließen, die in den unscharfen verbalen Mischungsansprachen der Praxis steckt, wird im folgenden ein Bestandesstrukturgenerator entwickelt. Auf verbalen Mischungsansprachen aufbauend, soll dieser Bestandesstrukturen erzeugen, die in den dynamikprägenden Strukturmerkmalen mit dem wirklichen Bestand übereinstimmen und als Startwerte für Prognoseläufe mit positionsabhängigen Einzelbaumwuchsmodellen eingesetzt werden können.

## 2. Material

Die Untersuchung stützt sich auf 53 Mischbestandsversuchsflächen aus Buche und Europäischer Lärche, die von Dippel (1988) auf lößbeeinflußten Buntsandsteinböden des Südniedersächsischen Berglandes und Weserberglandes in den Forstämtern Uslar (heute Knobben, Hardeggen und Winnefeld), Bovenden, Fürstenberg, Katlenburg und Stadtoldendorf angelegt wurden. Die Versuchsflächen sind 0,09 bis 0,49 ha groß und als Altersreihe konzipiert, die bei der Buche einen Altersrahmen von 49 bis 149, bei der Lärche von 36 bis 149 Jahren abdeckt (Tabelle 1). Der Altersvorsprung der Buche gegenüber der Lärche beträgt maximal 25 Jahre, so daß es sich

um mehr oder weniger gleichaltrige Mischbestände handelt, deren vertikale Schichtung weniger auf Ungleichaltrigkeit als vielmehr auf den verschiedenen Wachstumsrhythmen der Mischbaumarten beruht. Von allen Versuchsflächen liegt eine ertragskundliche Vollaufnahme einschließlich Stammverteilungsplänen und Kronenkarten vor, so daß das Datenmaterial gut für die folgenden Strukturuntersuchungen geeignet ist. Die 53 Flächen repräsentieren ein breites Spektrum von Bestandesaltern, und die Lärche hat einen grundflächenbezogenen Mischungsanteil bis zu 40 Prozent; sie ist der Buche einzeln, in Trupps, Gruppen, Horsten und Streifen beigemischt (zur Definition dieser Mischungsformen vgl. Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, 1987).

### 3. Messung von Aggregation und Segregation

Das mit den Flächen abgedeckte breite Spektrum von Mischungskonfigurationen aus Buchen und Lärchen spiegelt sich in einer ebenso breiten Schwankung der Aggregationsindizes  $R$  von Clark und Evans (1954) und der Segregationsmaße  $S$  von Pielou (1977) wider – beides Maßzahlen für das Baumverteilungsmuster (Tabelle 1).

#### 3.1 Aggregationsindex $R$ von Clark und Evans

Der Aggregationsindex  $R$  von Clark und Evans (1954) beschreibt das Verhältnis zwischen dem beobachteten mittleren Abstand  $\bar{r}$  zum nächsten Nachbarn auf einer Fläche und dem bei zufälliger Baumverteilung erwarteten mittleren Abstand  $\bar{r}$ .

$$R = \frac{\bar{r}_{\text{beobachtet}}}{\bar{r}_{\text{erwartet}}} \quad (1)$$

$R$  liegt theoretisch zwischen 0 (stärkste Klumpung) und 2,1491 (streng regelmäßiges Hexagonalmuster) und gibt Auskunft darüber, ob die Bestandesglieder regelmäßig, zufällig oder geklumpt über eine Fläche verteilt sind. Aggregationswerte kleiner als 1,0 zeigen eine Tendenz zur Klumpung an, Werte um 1,0 eine zufällige Verteilung und Werte über 1,0 zeigen eine Tendenz zur regelmäßigen Verteilung an.  $R$  ergibt sich nach der Methode des nächsten Nachbarn, indem für alle  $N$  Bäume auf einer Testfläche der Größe  $A$  die Distanzen  $r_i, i = 1 \dots N$  zu ihrem jeweils nächsten Nachbarn und darauf aufbauend die mittlere Distanz

$$\bar{r}_{\text{beobachtet}} = \frac{\sum_{i=1}^N r_i}{N} \quad (2)$$

zum nächsten Nachbarn berechnet wird. Diese tatsächliche, beobachtete Distanz zum nächsten Nachbarn wird ins Verhältnis gesetzt zur erwarteten durchschnittlichen Distanz  $\bar{r}$  erwartet bei zufälliger Baumverteilung

$$\bar{r}_{\text{erwartet}} = \frac{1}{2\sqrt{\rho}}, \quad (3)$$

Tabelle 1. Bestandeskennwerte und Verteilungsindizes R und S für 53 Buchen-Lärchen-Mischbestände im Südniedersächsischen Bergland und im Weserbergland.

(+, ++, +++ bezeichnen eine mit 5-, 1- bzw. 0,1%iger Irrtumswahrscheinlichkeit gesicherte Gleichverteilung, \*, \*\*, \*\*\* eine mit 5-, 1- bzw. 0,1 %iger Irrtumswahrscheinlichkeit gesicherte Klumpung, † eine mit 5%iger Irrtumswahrscheinlichkeit gesicherte Segregation und ∅ bezeichnet eine mit 5%iger Irrtumswahrscheinlichkeit gesicherte unabhängige Verteilung)

Table 1. Stand values and distribution indices R and S for 53 mixed stands of beech and larch in the mountainous region of the southern part of Lower Saxony and in the Weser Mountains.

(+, ++, +++ stand for an equal distribution with an error probability of 5, 1, and 0.1 %; \*, \*\*, \*\*\* stand for clustered distribution and an error probability of 5, 1, and 0.1 %; † means segregation and ∅ independent distribution with an error probability of 5 %)

Fläche	Größe (ha)	Alter (Jahre)	N/ha			G/ha in qm			R <sub>CLARK &amp; EVANS</sub>			S <sub>SPIELOU</sub>	
			ges.	Bu	Lä	ges.	Bu	Lä	ges.	Bu	Lä		
Uslar	101	0,09	59	1200	944	256	38,1	21,7	16,4	1,08	0,99	0,75*	0,12
	102	0,09	63	1066	844	222	38,1	20,3	17,8	1,09	1,00	0,58**	0,24
	103	0,09	63	1555	1222	333	43,0	19,1	23,9	0,06	0,89*	0,67**	-0,18
	104	0,25	90	380	340	40	31,5	25,1	6,4	1,29***	1,25***	0,54*	-0,03
	105	0,16	73	643	512	131	27,6	12,9	14,7	0,98	0,92	0,86	-0,24
	106	0,25	89	324	272	52	28,2	21,6	6,6	1,29***	1,21**	0,50***	-0,06
	107	0,16	126	394	350	44	35,8	22,6	13,2	1,20**	1,15	0,41**	-0,09
	108	0,16	143	250	169	81	29,6	19,5	10,1	1,11	1,10	0,68*	-0,05
	109	0,36	138	289	214	75	35,9	24,4	11,5	1,25***	1,12	0,79	-0,23
	110	0,20	143	187	118	69	37,5	22,6	14,9	1,25**	1,05	0,81	0,07
	111	0,20	143	247	163	84	40,5	23,3	17,2	1,23**	1,08	0,92	-0,23
	112	0,49	148	123	96	27	27,3	20,3	7,0	1,29***	1,23**	0,65*	-0,22
Bovenden	201	0,16	49	1043	881	162	31,4	18,8	12,6	1,02	0,90*	0,75*	-0,05
	202	0,16	67	1006	900	106	38,7	24,8	13,9	1,08	1,03	0,58**	-0,09
	203	0,16	69	737	625	112	34,3	22,6	11,7	1,19***	1,12*	0,55**	-0,08
	204	0,16	92	306	244	62	32,4	23,1	9,3	1,21*	1,11	0,58*	-0,20
	205	0,16	72	669	532	137	38,9	21,7	17,2	1,13*	1,10	0,64**	-0,21
	206	0,16	65	925	819	106	32,1	22,1	10,0	1,06	1,02	0,53***	-0,14
	207	0,16	58	819	725	94	31,1	22,0	9,1	1,09	1,03	0,59**	-0,05
	208	0,16	78	644	550	94	40,2	23,6	16,6	1,11*	1,02	0,61*	-0,14
	209	0,16	78	643	531	112	42,7	21,2	21,5	1,11*	0,97	0,82	0,09
	210	0,16	126	382	338	44	38,2	24,0	14,2	1,09	1,11	0,51*	-0,19
Fürstenberg	301	0,09	51	1272	1128	144	34,4	22,6	11,8	1,08	1,00	0,62*	0,13
	302	0,09	67	833	644	189	34,1	20,4	13,7	1,03	0,85*	0,78	0,05
	303	0,09	67	823	667	156	35,6	21,3	14,3	1,05	0,87	0,71	0,02
	304	0,16	82	400	319	81	29,3	17,0	12,3	1,11	1,00	0,67*	0,19
	305	0,16	84	449	362	87	36,4	23,1	13,3	1,20**	1,04	0,66*	0,25
	306	0,16	97	456	387	69	34,7	24,0	10,7	1,20**	1,19**	0,58*	-0,20
	307	0,16	106	281	237	44	36,3	24,9	11,4	1,23**	1,20*	0,52*	-0,26
	308	0,16	106	293	231	62	33,6	21,5	12,1	1,22**	1,21*	0,63*	-0,07
	309	0,16	106	287	218	69	34,3	21,4	12,9	1,25**	1,22*	0,61*	-0,28
	310	0,25	106	360	320	40	38,3	29,1	9,2	1,19**	1,18**	0,45**	-0,15
	311	0,36	95	295	214	81	47,7	25,6	22,1	1,21***	1,17**	0,75*	-0,25†
Kaitenburg	401	0,09	63	811	711	100	28,2	17,8	10,4	1,01	0,91	0,63	0,35∅
	402	0,16	79	443	362	81	30,6	19,1	11,5	1,07	1,05	0,59*	-0,12
	403	0,09	70	622	444	178	32,3	11,0	21,3	0,95	0,76**	0,85	-0,01
	404	0,16	76	925	781	144	38,0	22,9	15,1	1,03	1,01	0,56***	-0,21†
	405	0,16	84	450	350	100	36,4	22,4	14,0	1,23***	1,13	0,75	-0,11
	406	0,36	120	148	117	31	28,6	20,4	8,2	1,14	1,12	0,67	-0,35
	407	0,25	129	136	100	36	32,5	19,6	12,9	1,31**	1,24*	0,59*	0,05
	408	0,49	138	104	88	16	29,1	22,8	6,3	1,28**	1,19*	0,69	-0,20
	409	0,49	138	119	90	29	32,3	23,8	8,5	1,31***	1,27**	0,68*	-0,29
Stadtdendorf	501	0,09	61	844	611	233	37,3	20,3	17,0	1,24***	1,15	0,75*	-0,15
	502	0,16	81	456	331	125	35,6	15,9	19,7	1,16*	1,03	0,80	-0,14
	503	0,16	91	381	300	81	33,2	21,7	11,5	1,28***	1,18*	0,64*	-0,02
	504	0,16	92	400	300	100	35,9	21,8	14,1	1,26***	1,08	0,73	0,03
	505	0,16	113	331	275	56	31,6	24,7	6,9	1,34***	1,25**	0,63	-0,28
	506	0,36	106	178	147	31	29,6	23,7	5,9	1,29***	1,18*	0,71	-0,03
	507	0,16	114	249	187	62	33,8	24,1	9,7	1,30***	1,07	0,84	-0,25
	508	0,25	140	136	108	28	29,0	24,6	4,4	1,22*	1,18	0,54*	0,18
	509	0,25	146	228	148	80	31,9	19,1	12,8	1,33***	1,21*	0,84	0,04
	510	0,25	146	176	144	32	30,2	23,4	6,8	1,31***	1,16	0,76	0,25
	511	0,25	149	128	88	40	27,9	31,3	6,6	1,36***	1,24	0,81	-0,58†

wobei  $\rho$  die Zahl der Bäume pro Flächeneinheit ( $N/A$ ) bezeichnet. Der Aggregationsindex  $R$  ist demnach ein Maß für die Abweichung des beobachteten Verteilungsmusters von der Poisson-Verteilung. Clark und Evans (1954) folgend, wurden die Abweichungen von der Poisson-Verteilung in Richtung Gleichverteilung oder Klumpung mit den in Tabelle 1 angegebenen Resultaten auf Signifikanz geprüft. Randeffekte wurden mit der Randkorrekturformel für kompakte Flächenformen von Donnelly (1978) ausgeschaltet.

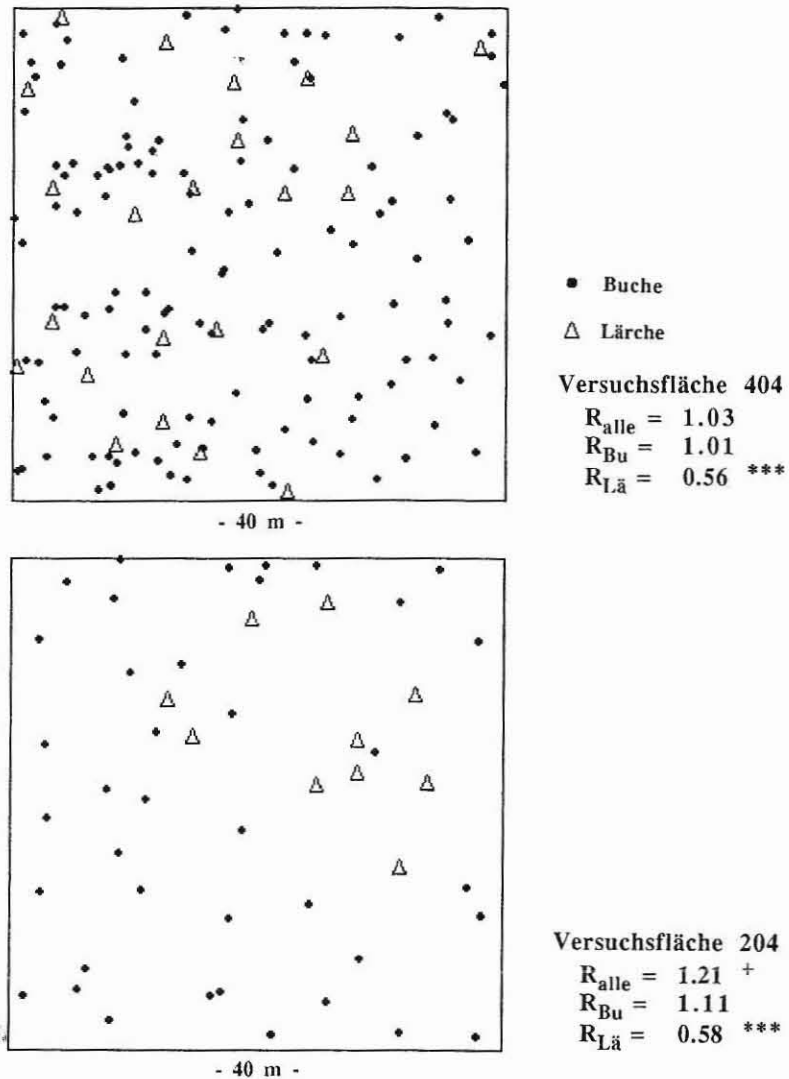


Abb. 1. Identifikation der Verteilungsmuster von Buchen und Lärchen auf den Versuchsflächen 404 und 204 mit dem Aggregationsindex von Clark und Evans (1954)

Fig. 1. Identification of the spatial patterns of beech and larch on the experimental plots 404 and 204 with the aggregation index by Clark and Evans (1954)

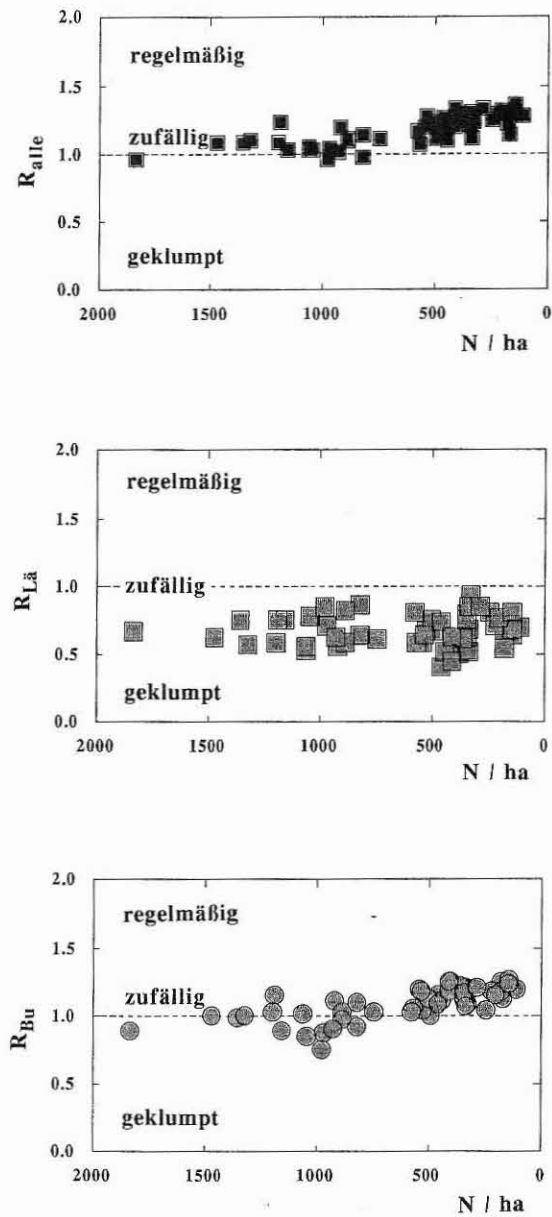


Abb. 2. Veränderung der Aggregationsindizes  $R_{alle}$  für den Bestand insgesamt (oben),  $R_{La}$  für die Lärchen (Mitte) und  $R_{Bu}$  für die Buchen (unten) mit abnehmender Stammzahl. Die eingezeichnete Referenzlinie ( $R = 1,0$ ) repräsentiert zufällige Verteilung, größere Werte deuten auf eine Tendenz zur regelmäßigen Verteilung, geringere Werte auf eine eher geklumpte Verteilung hin

Fig. 2. Change of the aggregation indices  $R_{alle}$  for the whole stand (above),  $R_{La}$  for larch (middle) and  $R_{Bu}$  for beech (below) with decreasing stem number. The referential line ( $R = 1.0$ ) represents random distribution, higher values indicate a trend to regular distribution, lower values indicate a trend to clustered distribution

Abbildung 1 vermittelt den Zusammenhang zwischen Verteilungsmuster und Aggregationsindex  $R$ : Auf der 76jährigen (Alter der Buche), noch relativ stammzahlreichen Versuchsfläche 404 sind die Gesamtpopulation und die Buche für sich betrachtet etwa zufällig verteilt ( $R_{\text{alle}} = 1,03$  und  $R_{\text{Bu}} = 1,01$ ). Die Lärche für sich betrachtet kommt geklumpt vor ( $R_{\text{Lä}} = 0,56$ ). Demgegenüber sind Gesamtpopulation und Buche auf der 92jährigen und weiter ausdifferenzierten Versuchsfläche 204 schon regelmäßig verteilt ( $R_{\text{alle}} = 1,21$  und  $R_{\text{Bu}} = 1,11$ ). Die Lärche kommt hier in gruppengroßen Clustern signifikant geklumpt vor ( $R_{\text{Lä}} = 0,58$ ).

Auf den 53 Buchen-Lärchen Mischbestandsflächen liegen die Verteilungsindizes der Gesamtpopulation zwischen  $R_{\text{alle}} = 1,0$  und  $1,4$ , d. h. die Baumverteilung ist zufällig bis regelmäßig (Abb. 2, oben). Mit fortschreitender Bestandesentwicklung, hier ausgedrückt durch abnehmende Stammzahlen, nimmt die Regelmäßigkeit zu. Der Aggregationswert für die Lärchen allein liegt im gesamten Altersbereich zwischen  $R_{\text{Lä}} = 0,5$  und  $1,0$  mit Mittelwert bei  $0,75$  und deutet auf ein geklumpstes Auftreten dieser Baumart hin, an dem sich auch mit zunehmender Bestandesreife nichts ändert, d. h. Trupps, Gruppen und Horste bleiben erhalten (Abb. 2, Mitte). Die Buche ist bei Werten zwischen  $R_{\text{Bu}} = 0,7$  und  $1,4$  zunächst geklumpt vertreten, mit zunehmendem Alter dann zufällig bis regelmäßig verteilt (Abb. 2, unten).

### 3.2 Segregationsmaß $S$ von Pielou

Das Segregationsmaß  $S$  von Pielou (1977) beschreibt die Kombination oder Mischung zweier Baumarten wiederum nach der Methode des nächsten Nachbarn (Tabelle 1). Für seine Berechnung wird in einem Suchlauf für alle  $N$  Bäume einer Testfläche die Baumart ihrer nächsten Nachbarn bestimmt, so daß sowohl die Anzahl vorhandener Bäume der Arten 1 und 2 ( $m, n$ ) als auch die Zahl der Bäume mit gleichartigen Nachbarn ( $a, d$ ) und verschiedenartigen Nachbarn ( $c, b$ ) bekannt sind (Tabelle 2). Das Segregationsmaß  $S$  ergibt sich dann als

$$S = 1 - \frac{\text{beobachtete Zahl gemischter Paare}}{\text{erwartete Zahl gemischter Paare}} \quad (4)$$

und liegt zwischen  $-1,0$  und  $+1,0$ . Es wird aus den in der Vierfeldertafel (Tabelle 2) angegebenen Basisgrößen wie folgt berechnet

$$S = 1 - \frac{N * (b + c)}{(v * n + w * m)} \quad (5)$$

Tabelle 2. Vierfeldertafel mit den Basisgrößen für die Berechnung des Segregationsmaßes  $S$  (vgl. Gl. 5)  
Table 2. Four-field table with the basic values for the determination of the segregation index  $S$  (cf. eq. 5)

		Nächster Nachbar		
		Baumart 1	Baumart 2	gesamt
Ausgangsbaum	Baumart 1	$a$	$b$	$m$
	Baumart 2	$c$	$d$	$n$
		$v$	$w$	$N$



Zur Prüfung der Segregationsindizes auf eine signifikante Abweichung von einer unabhängigen Verteilung der zwei Mischbaumarten wurde die von Upton und Fingleton (1985) empfohlene  $\chi^2$ -verteilte Teststatistik eingesetzt. Ist die beobachtete Zahl gemischter Paare höher als erwartet, so wird  $S < 0$  und deutet auf eine enge Kopplung bzw. Assoziation zwischen den Arten hin. Ist die beobachtete Zahl gemischter Paare kleiner als erwartet, so wird  $S > 0$  und zeigt eine Segregation, d. h. eine räumliche Trennung der Arten an. Ist  $S = 0$ , d. h. die beobachtete Zahl gemischter Paare entspricht der erwarteten, so sind die Arten unabhängig voneinander verteilt.

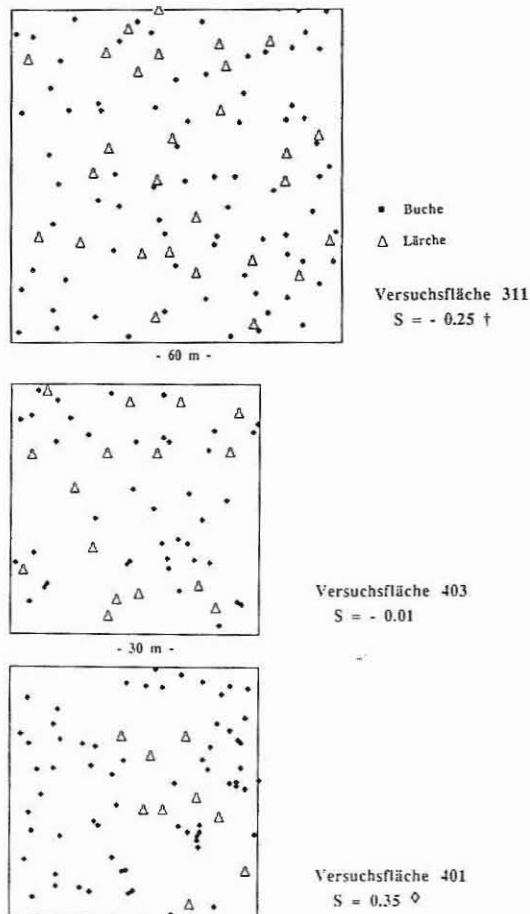


Abb. 3. Identifikation der Durchmischung von Buchen und Lärchen auf den Versuchsflächen 311, 403 und 401 mit dem Segregationsindex von Pielou (1977)

Fig. 3. Identification of the mixture of beech and larch on the experimental plots 311, 403 and 401 and segregation index by Pielou (1977)

Abbildung 3 (von oben nach unten) zeigt drei Versuchsflächen mit einer zunehmenden Trennung zwischen den Arten: Die intensive Durchmischung von Lärche und Buche auf Versuchsfläche 311 spiegelt sich in einem Segregationsindex von

$S = -0,25$  wieder. Auf Versuchsfläche 403 sind Lärchen und Buchen nahezu unabhängig voneinander verteilt und erbringen einen Wert von  $S = -0,01$ . Versuchsfläche 401 repräsentiert eine ausgeprägte Segregation von Lärche und Buche, so daß  $S$  in diesem Fall  $0,35$  beträgt.

39 der 53 Versuchsflächen zeigen negative Segregationswerte (Tabelle 1), also eine in Pflanzenpopulationen eher selten ausgeprägte Tendenz zur Assoziation (Pielou, 1977). Das ist darauf zurückzuführen, daß Lärchen, auch wenn sie in Trupp-, Gruppen-, Horst oder Streifenmischung vorkommen, meist eng mit Buchen umfüttert sind und dann mit Buchen in engerem nachbarlichen Verband als mit gleichartigen Nachbarn stehen. An dieser engen Kopplung von Buche und Lärche ändert auch die fortschreitende Bestandesentwicklung nichts, d. h. es findet keine Entmischung statt (Abb. 4).

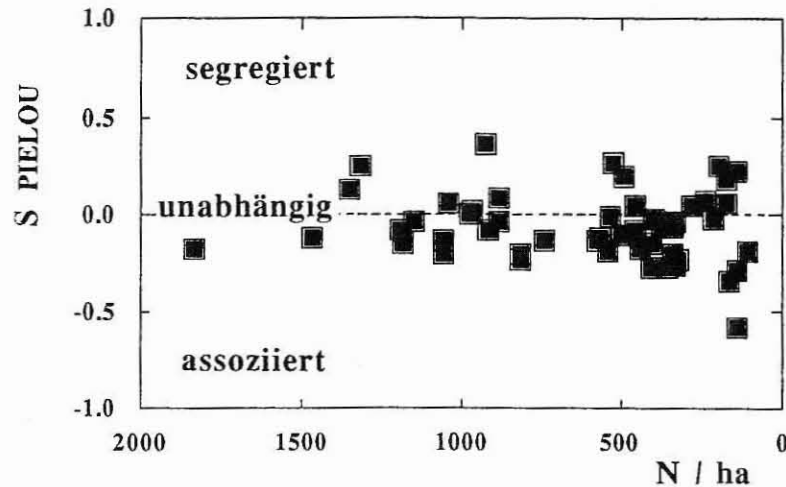


Abb. 4. Veränderung der Segregationsindizes  $S$  mit abnehmender Stammzahl. Die eingezeichnete Referenzlinie ( $S = 0,0$ ) repräsentiert eine unabhängige Verteilung der Mischbaumarten, größere Werte deuten auf eine Trennung zwischen den Mischbaumarten, geringere Werte auf eine Assoziation der Mischbaumarten hin

Fig. 4. Change of the segregation indices  $S$  with decreasing stem number. The referential line ( $S = 0,0$ ) represents an independent distribution of the species; higher values indicate a segregation, lower values an association of the species

#### 4. Modellhafte Reproduktion der Bestandesstruktur

In der Praxis sind so umfassende Angaben über die Bestandesstruktur, wie sie uns von den 53 Versuchsflächen vorliegen, die Ausnahme; wir verfügen dann meist nur über verbale Ansprachen der Mischung (z. B. truppweise oder gruppenweise Mischung) oder über ein Gemisch von verbalen und numerischen Mischungsattributen (z. B. Streifenmischung mit 20 m Streifenbreite). Um aber auch die Strukturinformation zu erschließen, die in solchen unscharfen Ansprachen steckt, wurde ein Strukturgenerator entwickelt.

#### 4.1 Funktionsprinzip des Strukturgenerators STRUGEN

Angestrebt wird ein Strukturgenerator, der auf den in der forstlichen Praxis üblichen Mischungsansprachen aufbauend, einen Bestand generiert, der in den dynamikprägenden Strukturmerkmalen dem wirklichen Bestand entspricht. Auf unsere Buchen-Lärchen-Mischbestände übertragen heißt das: Eine gegebene Anzahl von Buchen und Lärchen mit bekannter Durchmesser- und Höhenverteilung soll gezielt so auf einer Bestandesfläche angeordnet werden, daß zwischen der wirklichen und der generierten Struktur eine möglichst weitgehende Übereinstimmung besteht. Übereinstimmung heißt in diesem Fall nicht, daß ein bestimmter Baum im wirklichen und generierten Bestand auf ein und derselben Stelle stehen muß, sondern daß die dynamikprägenden Merkmale von wirklichem und generiertem Bestand einander entsprechen, d. h., daß die Mischungsspannung, Berührungshäufigkeiten sowie Aggregation und Segregation der Arten von Ur- und Abbild vergleichbar sind.

Das Funktionsprinzip des Strukturgenerators, der hier für Buchen-Lärchen-Mischbestände entwickelt wurde, aber ohne großen Aufwand auf andere Rein- und Mischbestände übertragen werden kann, soll hier nur in seinen wichtigsten Merkmalen skizziert werden: Angenommen, die auf Abb. 5 dargestellte Stammzahldurchmesserverteilung einer Zwei-Arten-Mischung aus Lärche und Buche soll mit STRUGEN auf eine Testfläche ausgebracht werden, dann werden in einem ersten Schritt alle Lärchen mit zufälligen, uniform verteilten  $x$ - und  $y$ -Koordinaten versehen, die als „Punkteregen“ auf die Fläche fallen. Ausgangspunkt des Generators ist also ein homogener Poisson-Prozeß. Zur Erzeugung der Makrostruktur des Bestandes werden die Punkte mit verschiedenen Wahrscheinlichkeiten akzeptiert, die bei Cluster- oder Streifenmischung über die Funktionen  $Z_C(x, y)$  bzw.  $Z_S(x, y)$  gesteuert werden. Anschaulich gesprochen heißt das, die Punkte müssen einen ersten Filter passieren, der die Mischungsform reguliert, indem er die Zufallspunkte mit verschiedenen positionsabhängigen Wahrscheinlichkeiten durchläßt. Von diesen, durch den ersten Filter gelangten Punkten werden nur die akzeptiert, die bestimmte Mindestabstände zu den bereits etablierten Nachbarbäumen haben, d. h. bevor ein Punkt endgültig angenommen wird, muß er einen zweiten Filter passieren, der atypische Individualdistanzen und damit die Mikrostruktur zwischen den Bäumen herstellt. Dieser Prozeß des Ausstreuens wird so lange wiederholt, bis die gesamte Durchmesserverteilung der Lärche abgearbeitet ist. Anschließend setzt ein zweiter Punktprozeß ein, über den die Hauptbaumart Buche eingebracht wird (Abb. 5, rechts). Ein dritter Filter, die Funktion  $Z_D(x, y)$  steuert dabei die Durchmischung von Buche und Lärche, und ein vierter Filter stellt wiederum Mindestabstände zwischen benachbarten Bäumen sicher.

#### 4.2 Wahrscheinlichkeitsfunktionen zur Erzeugung von arrondierten Clustern und Streifen

Zur Erzeugung von arrondierten Mischungsclustern, die Form und Größe von Trupps, Gruppen oder Horsten haben (Abb. 5, Filter 1), wird folgende in Anlehnung an Lepš und Kindelmann (1987) entwickelte Funktion eingesetzt, die für jeden Punkt  $(x, y)$  auf der Testfläche eine Wahrscheinlichkeit zwischen 0 und 1 angibt, mit der an dieser Stelle mit dem Auftreten der betreffenden Mischbaumart zu rechnen ist:

$$Z_C(x, y) = \min \left( 1, \sum_{i=1}^q e^{\left[ -((x-X_i)^2 + (y-Y_i)^2) / E_i^2 \right]} \right) \quad (6)$$

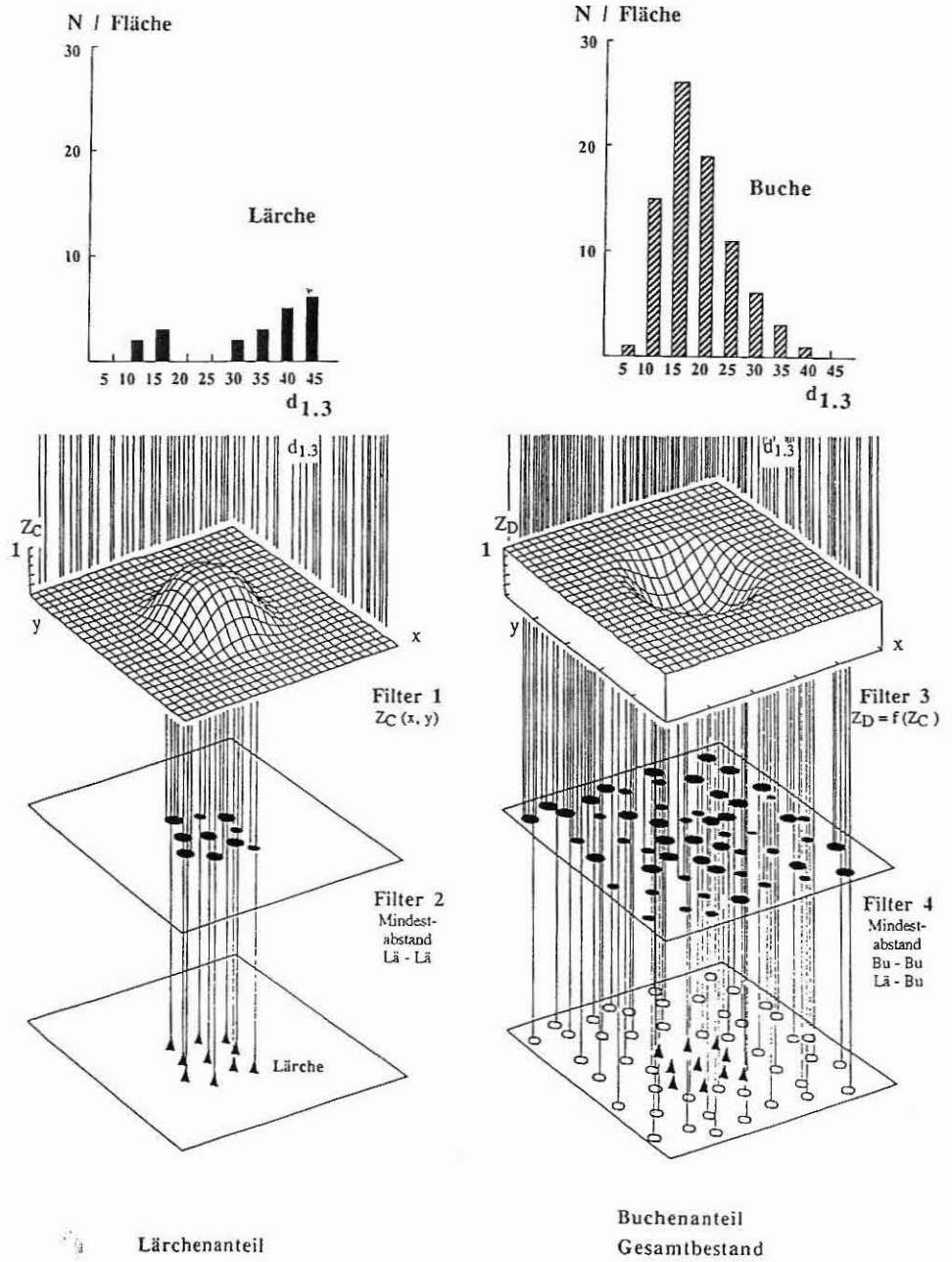


Abb. 5. Funktionsprinzip des Strukturgenerators STRUGEN  
 Fig. 5. Functional principle of the stand structure generator STRUGEN

Die zufällig erzeugten Stammfußkoordinaten erbrächten eine Zufalls- oder Poisson-Verteilung, sie werden aber nur mit einer positionsabhängigen Wahrscheinlichkeit  $Z_C = f(x, y)$  akzeptiert. Das wird bewerkstelligt, indem ein Punkt nur dann angenommen und als Stammfußpunkt auf der Testfläche etabliert wird, wenn eine gleichverteilte Zufallszahl  $u$  ( $u \in [0, 1]$ ) kleiner als der Wert  $Z_C(x, y)$  ist. In Formel 6 gibt  $q$  die Zahl der Cluster an, die auf der Fläche etabliert werden sollen.  $X_i, Y_i, i = 1 \dots q$  geben die Mittelpunktskoordinaten der  $q$  Cluster an,  $E_i, i = 1 \dots q$  steuert den Durchmesser der  $q$  Cluster. Je näher ein Punkt einem Clustermittelpunkt liegt, umso kleiner werden die Distanzen  $x - X_i$  und  $y - Y_i$ , und umso näher liegt die Wahrscheinlichkeit, daß der Punkt akzeptiert wird, bei 1,0.

Abbildung 6 zeigt Funktionen  $Z_C(x, y)$ , mit denen Trupp-, Gruppen-, Horst- und Trupp- bis Horstbeimischung der Lärche in einen Grundbestand von Buchen erzeugt werden können. Für jeden Punkt auf der Testfläche geben sie Wahrscheinlichkeiten zwischen 0 und 1 an, mit der die erzeugten Zufallspunkte als Stammfüße akzeptiert werden.

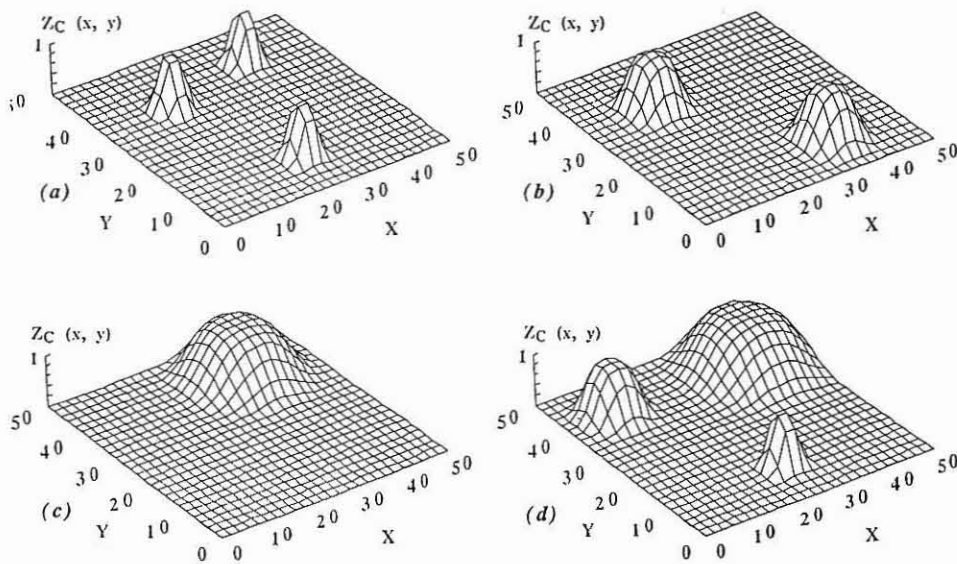


Abb. 6. Funktion  $Z_C(x, y)$  zur Generierung verschiedener Mischungsformen auf einer 50 m \* 50 m großen Testfläche

- (a) Truppmischung, bestehend aus 3 Clustern mit  $E = 10$
- (b) Gruppenmischung, bestehend aus 2 Clustern mit  $E = 30$
- (c) Horstmischung, bestehend aus einem Cluster mit  $E = 100$
- (d) Kombination verschiedener Mischungsformen, bestehend aus drei arrondierten Clustern mit  $E = 10$ ,  $E = 30$  bzw.  $E = 100$

Fig. 6. Function  $Z_C(x, y)$  for generating different mixture patterns on a test plot of 50 metres in length and 50 metres in width

- (a) Three small clusters with  $E = 10$
- (b) Group mixture, consisting of two clusters with  $E = 30$
- (c) One big cluster with  $E = 100$
- (d) Combination of different mixture forms, consisting of three arrounded clusters with  $E = 10$ ,  $E = 30$ , and  $E = 100$

Die in den untersuchten niedersächsischen Buchen-Lärchen-Mischbeständen weitverbreitete Streifenmischung wird durch die Funktion

$$Z_S(x, y) = e^{[-(\cos \alpha * (x - X_M) + \sin \alpha * (y - Y_M))^2 / E^2]} \quad (7)$$

erzeugt, in der  $E$ , analog zur Modellierung arrondierter Cluster (Gl. 6), wieder das Konzentrationsmaß bezeichnet, das die Streifenbreite bestimmt. Der Generator STRUGEN bildet die Streifenachse als Gerade  $\cos \alpha * x + \sin \alpha * y = 0$  nach, die er, sofern nicht anders spezifiziert, durch den Mittelpunkt  $(X_M, Y_M)$  der Testfläche legt. Die Steigung der Geraden fließt über den Winkel  $\alpha$  zwischen der Geraden und der  $y$ -Achse der Testfläche in Gl. 7 ein. Abbildung 7 zeigt die Funktion  $Z_S(x, y)$  bei verschiedenen Streifenwinkeln und Streifenbreiten, wobei der Streifen jeweils durch den Flächenmittelpunkt verläuft. Zwischen dem Durchmesser der Mischungseinheit  $D$  ( $D =$  Öffnungsweite in m bei  $Z_C(x, y) = 0,05$ ) und dem Konzentrationsmaß  $E$  der Wahrscheinlichkeitsfunktionen besteht der Zusammenhang

$$E = 0,1444 * D^{2,0}, \quad (8)$$

so daß für eine zu generierende Mischung aus  $D$  das entsprechende Konzentrationsmaß  $E$  abgeleitet und zum Aufbau der Funktionen 6 und 7 eingesetzt werden kann.

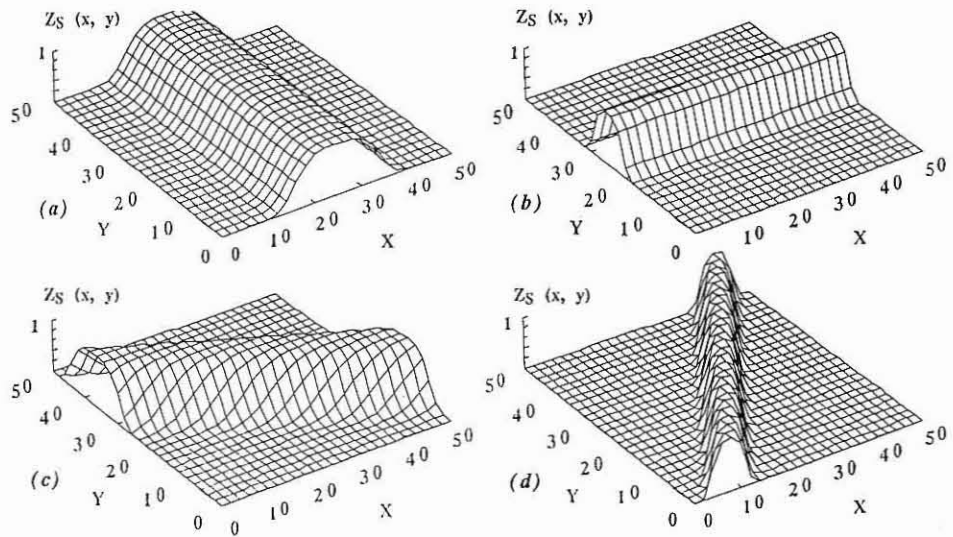


Abb. 7. Funktion  $Z_S(x, y)$  zur Generierung verschiedener Streifenmischungen auf einer 50 m \* 50 m großen Testfläche

- (a)  $\alpha = 0, E = 100$
- (b)  $\alpha = 90, E = 20$
- (c)  $\alpha = 65, E = 50$
- (d)  $\alpha = 145, E = 10$

Fig. 7. Function  $Z_S(x, y)$  for generating different stripe mixtures on a test plot of 50 metres in length and 50 metres in width

- (a)  $\alpha = 0, E = 100$
- (b)  $\alpha = 90, E = 20$
- (c)  $\alpha = 65, E = 50$
- (d)  $\alpha = 145, E = 10$

### 4.3 Perzentillinien und Mindestabstände

Erzeugte Zufallspunkte werden nur dann akzeptiert, wenn sie einen Mindestabstand, gewissermaßen eine Individualdistanz, zu bereits etablierten Bäumen nicht unterschreiten. Zur Bestimmung dieser Grenzdistanzen wurden von den ca. 5000 Bäumen der Flächenserie die Distanzen von Lärchen zu nächstgelegenen Lärchen, von Buchen zu nächstgelegenen Buchen und von Lärchen zu nächstgelegenen Buchen bestimmt und die jeweiligen Baumdurchmesser registriert. Darauf aufbauend können die 1-, 25-, 50-, 75- und 99 %-Perzentile dieser Distanzen über dem Durchmesser dargestellt werden (Abb. 8). Aus diesen Perzentillinien kann dann z. B. abgelesen werden, daß eine Lärche mit einem Durchmesser von 50 cm von der nächstgelegenen Lärche in 99 % der beobachteten Fälle mehr als 180 cm entfernt ist. Von einer Buche zur nächsten Buche beträgt dieser Wert 250 cm. Am kleinsten ist die entsprechende Individualdistanz mit 160 cm zwischen Lärche und Buche. In den verschiedenen Verläufen der Perzentillinien kommt das baumartentypische Konkurrenzverhalten zum Ausdruck. Die parametrisierten 1 %-Perzentillinien (Angaben von Mindestabstand  $Ma$  und Baumdurchmesser BHD in cm)

$$Ma_{L\ddot{a} \rightarrow L\ddot{a}} = e^{3,190} * BHD^{0,504} \quad (9)$$

$$Ma_{Bu \rightarrow Bu} = e^{-0,421} * BHD^{1,507} \quad (10)$$

$$Ma_{L\ddot{a} \rightarrow Bu} = e^{-0,374} * BHD^{1,323} \quad (11)$$

werden als Filter 2 bzw. Filter 4 (Abb. 5), die die baumartenspezifischen und durchmesserabhängigen Mindestdistanzen gewährleisten, in dem Generator eingesetzt.

### 4.4 Wahrscheinlichkeitsfunktionen zur Modellierung der Durchmischung

Filter 3 reguliert die Intensität, mit der den arrondierten Clustern und den Streifen von Lärchen die Hauptbaumart Buche beigemischt ist. Hierfür wird eine Funktion  $Z_D$  eingesetzt, die für jede Position der Testfläche die Wahrscheinlichkeit angibt, mit der Zufallspunkte akzeptiert werden. Zum Aufbau der Funktion  $Z_D$  wird auf die Gl. 6 bzw. 7 zurückgegriffen (Filter 1). Wurde beispielsweise die auf Abbildung 9, links oben dargestellte Funktion  $Z_C = f(x, y)$  zur Modellierung einer Lärchengruppe auf der Testfläche eingesetzt, so bewirkt die rechts oben dargestellte Funktion  $Z_D = 1 - Z_C$  eine nur schwache Durchmischung der Lärchengruppen mit Buchen. Denn im Zentrum der Lärchengruppe, wo die Lärche mit einer Wahrscheinlichkeit von  $Z_C = 1,0$  akzeptiert wird, fehlt die Buche, weil dort  $Z_D = 0$  beträgt ( $Z_D = 1 - Z_C = 0$ ). An der Peripherie der Fläche, wo die Lärche mit einer Wahrscheinlichkeit von  $Z_C = 0,0$  akzeptiert wird, etabliert sich die Buche, weil hier  $Z_D = 1,0 - Z_C \cong 1,0$ . Zu einer schwachen Durchmischung kommt es daher nur im Saumbereich der Gruppe, wo  $0,0 \leq Z_D \leq 1,0$ , im Clusterzentrum schließen sich die beiden Baumarten gegenseitig mehr oder weniger aus. Es werden fünf Intensitätsstufen der Durchmischung unterschieden: schwache Durchmischung, mäßige, mittlere, starke und sehr starke Durchmischung (Gln. 12–16).

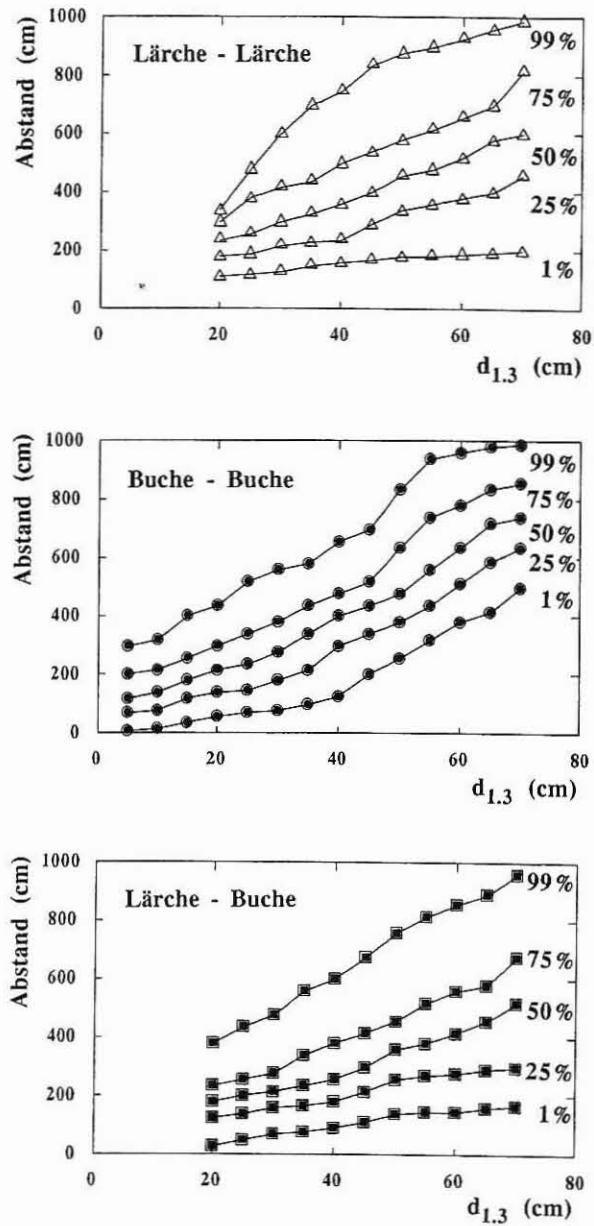


Abb. 8. Distanzen von Lärchen zu nächstgelegenen Lärchen (oben), von Buchen zu nächstgelegenen Buchen (Mitte) und von Lärchen zu nächstgelegenen Buchen (unten) in Abhängigkeit vom Baumdurchmesser. Dargestellt sind die 1-, 25-, 50-, 75- und 99 %-Perzentile, ermittelt aus den circa 5000 Bäumen der 53 Buchen-Lärchen-Mischbestandsversuchsflächen

Fig. 8. Distances between larches and nearest larches (above), between beeches and nearest beeches (middle) and between larches and nearest beeches (below) in dependence on the tree diameter. Presented are the 1-, 25-, 50-, 75-, and 99 %-percentiles, estimated on the basis of about 5000 trees of the experimental plots of the 53 beech-larch mixed stands



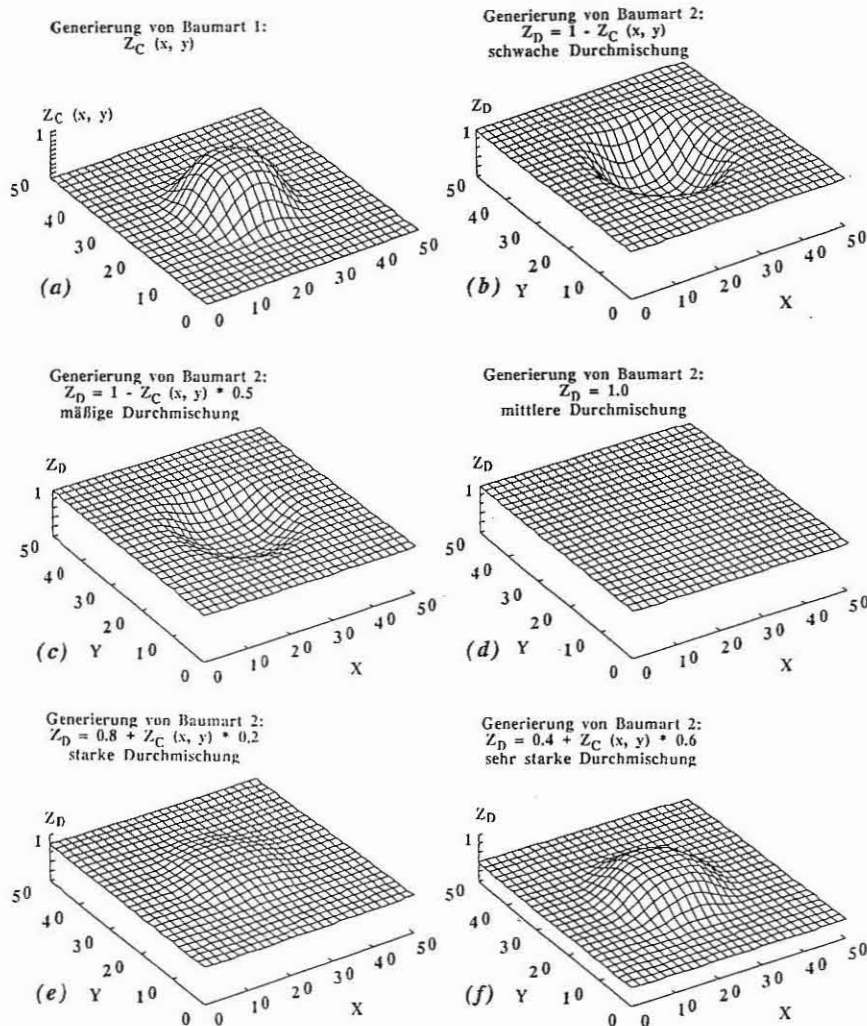


Abb. 9. Funktion  $Z_C(x, y)$  für die Generierung eines Lärchenhorsts ( $E = 100$ ) in einem Buchengrundbestand und Funktionen  $Z_D(x, y)$  zur Steuerung verschiedener Durchmischungsintensitäten

- (a)  $Z_C(x, y)$  für die Etablierung des Lärchenhorsts  
 (b)  $Z_D = 1 - Z_C$  erzeugt eine schwache Durchmischung  
 (c)  $Z_D = 1 - Z_C * 0.5$  erzeugt eine mäßige Durchmischung  
 (d)  $Z_D = 1.0$  erzeugt eine mittlere Durchmischung  
 (e)  $Z_D = 0.8 + Z_C * 0.2$  erzeugt eine starke Durchmischung  
 (f)  $Z_D = 0.4 + Z_C * 0.6$  erzeugt eine sehr starke Durchmischung

Fig. 9. Function  $Z_C(x, y)$  for generating larches arranged in one big cluster ( $E = 100$ ) in a basal stand of beeches, and functions  $Z_D(x, y)$  for the control of different mixture intensities

- (a)  $Z_C(x, y)$  in order to establish the larch  
 (b)  $Z_D = 1 - Z_C$  generates a slight association  
 (c)  $Z_D = 1 - Z_C * 0.5$  generates a moderate association  
 (d)  $Z_D = 1.0$  generates an average association  
 (e)  $Z_D = 0.8 + Z_C * 0.2$  generates a strong association  
 (f)  $Z_D = 0.4 + Z_C * 0.6$  generates a very strong association

$$Z_D = 1,0 - Z_C \quad (12)$$

$$Z_D = 1,0 - Z_C * 0,5 \quad (13)$$

$$Z_D = 1,0 \quad (14)$$

$$Z_D = 0,8 + Z_C * 0,2 \quad (15)$$

$$Z_D = 0,4 + Z_C * 0,6 \quad (16)$$

Soll die Durchmischung von Streifen modelliert werden, so wird in den Gleichungen 12 bis 16  $Z_C$  durch  $Z_S$  ersetzt, so daß die entsprechenden  $Z_D$ -Werte zur Steuerung von Akzeptanz bzw. Rückweisung bei verschiedenen Durchmischungsintensitäten der Streifen abgegriffen werden können. Diese fünf Funktionen korrespondieren mit einer fünfstufigen Anspruchsskala für die Durchmischungsintensität (schwach, mäßig, mittel, stark und sehr stark).

## 5. Ablaufplan des Strukturgenerators STRUGEN

Die Erzeugung einer Bestandesstruktur wird nach dem folgenden Ablaufplan abgewickelt: In einem ersten Schritt werden die Stammzahl-Durchmesserverteilung von Haupt- und Mischbaumart und die Abmessungen der nachzubildenden Testfläche eingelesen. Aufbauend auf den eingelesenen Durchmessern und einer baumartentypischen Grundbeziehung zwischen Durchmesser und Kronengröße (Pretzsch, 1993) wird in Schritt 2 der Standraumbedarf für die beteiligten Baumarten berechnet. Es folgt Schritt 3, in dem die Mischungskonfiguration spezifiziert wird: Eingeben werden die Mischungform (Streifen oder Clustermischung), die Ausdehnung der Mischungseinheiten (Streifenbreite bzw. Clusterdurchmesser) und die Durchmischungsintensität (schwache Durchmischung, mäßige, mittlere, starke und sehr starke Durchmischung). Damit wird spezifiziert, wie stark die Mischungseinheiten der Lärche mit Buchen durchsetzt sind. Aus diesen Mischungsattributen und dem in Schritt 2 berechneten Standraumbedarf werden in Schritt 4 automatisch die vorgestellten Filterfunktionen  $Z_C$ ,  $Z_S$  und  $Z_D$  aufgebaut. Für die eingegebene Durchmesser- und die spezifizierten Mischungsstrukturen werden in Schritt 5 nach dem auf Abbildung 5 vorgestellten Verfahren Verteilungen generiert, von denen in Schritt 6 die Aggregations- und Segregationswerte R und S berechnet werden. Der Generierungslauf schließt ab mit Schritt 7, in dem unter Verwendung von Grundbeziehungen zwischen Durchmesser und Höhe, Durchmesser und Kronenbreite sowie Durchmesser und Kronenansatzhöhe (Pretzsch, 1993) für den generierten Bestand Stammverteilungspläne und dreidimensionale Bestandesbilder erzeugt werden.

## 6. Abbildungsverhalten des Generators STRUGEN: Testläufe am Beispiel niedersächsischer Buchen-Lärchen-Mischbestände

Für einen ersten Testlauf wird die Stammzahldurchmesserverteilung von Versuchsfläche 105 (Buche: 82 Bäume/Parzelle, BHD = 5–40 cm dg = 17,9 cm; Lärche 21 Bäume/Parzelle, BHD = 10–45 cm d = 37,7 cm) eingelesen (Abb. 10a), die nun auf eine 40 m \* 40 m große Testfläche so ausgebracht werden soll, daß die Lärche der Buche in Gruppen (Durchmesser  $D = 15$  m) beigemischt ist und die Lärchengruppen mäßig mit Buchen durchmischt sind. Der Generator baut zunächst intern

die Funktion  $Z_C(x, y)$  auf (Abb. 10b), mit der die Lärchen in Gruppenmischung etabliert werden (Abb. 10 c und d). Anschließend werden die Buchen ausgestreut (Abb. 10e), wobei die Funktion  $Z_D(x, y)$  (Abb. 10f) eine mäßige Durchmischungsintensität der Lärchengruppen mit Buche erzeugt (Abb. 10 g und h). Der Clark und Evans-Index (Abb. 10 g) zeigt an, daß Gesamtpopulation ( $R_{\text{alle}} = 1,0266$ ) und Buche ( $R_{\text{Bu}} = 1,0415$ ) zufällig verteilt sind und die Lärche signifikant geklumpt auftritt ( $R_{\text{Lä}} = 0,5120^{***}$ ). Der Segregationsindex von Pielou ( $S = 0,2446$ ) zeigt eine Tendenz zur räumlichen Trennung von Lärche und Buche an.

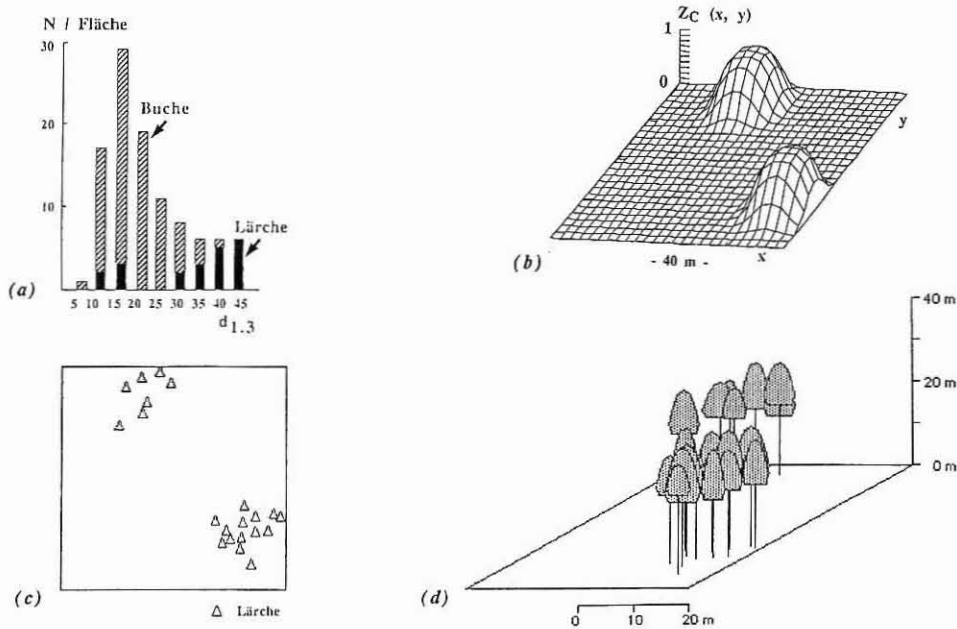


Abb. 10 a–d. Generierung der Lärche in Gruppenmischung und der Buche mit mäßiger Durchmischung der Lärche

- (a) Zugrundegelegte Stammzahl-Durchmesserverteilung von Versuchsfläche 105
- (b) Funktion  $Z_C(x, y)$  zur Etablierung der Lärche in Gruppenmischung  
( $X_1 = 15, Y_1 = 35, X_2 = 35, Y_2 = 10, E_1 = 32,49$  und  $E_2 = 32,49$ )
- (c) Stammverteilungsplan des generierten Lärchenanteils mit Angabe von Aggregation und Segregation
- (d) Generierte Lärchen-Gruppen in Seitenansicht

Fig. 10 a–d. Generating the larch in group mixture and beech and larch in moderate association

- (a) Diameter distribution of experimental plot 105 to be established on the plot
- (b) Function  $Z_C(x, y)$  in order to generate the larch in group mixture  
( $X_1 = 15, Y_1 = 35, X_2 = 35, Y_2 = 10, E_1 = 32,49$  and  $E_2 = 32,49$ )
- (c) Stem chart of the generated larches and indices of aggregation and segregation
- (d) Generated larch-groups in side view

Der Generator vermag ein breites Spektrum von Mischungsvarianten zu generieren und einen guten Einblick in den Zusammenhang zwischen Struktur und Verteilungsindizes zu vermitteln. Die auf Abbildungen 11 dargestellten, mit STRUGEN erzeugte Bestände mit trupp-, gruppen- und horstweise in den Buchenbestand eingemischten Lärchen und schwacher bis mittlerer Durchmischung der Lärche durch Buchen sind in den untersuchten Buchen-Lärchen-Mischbeständen sehr häufig ausge-

prägt. Bestände, in denen die Lärche der Buche in Reihen beigemischt ist, haben eine ähnliche flächenmäßige Bedeutung und können ebenfalls mit dem STRUGEN erzeugt werden.

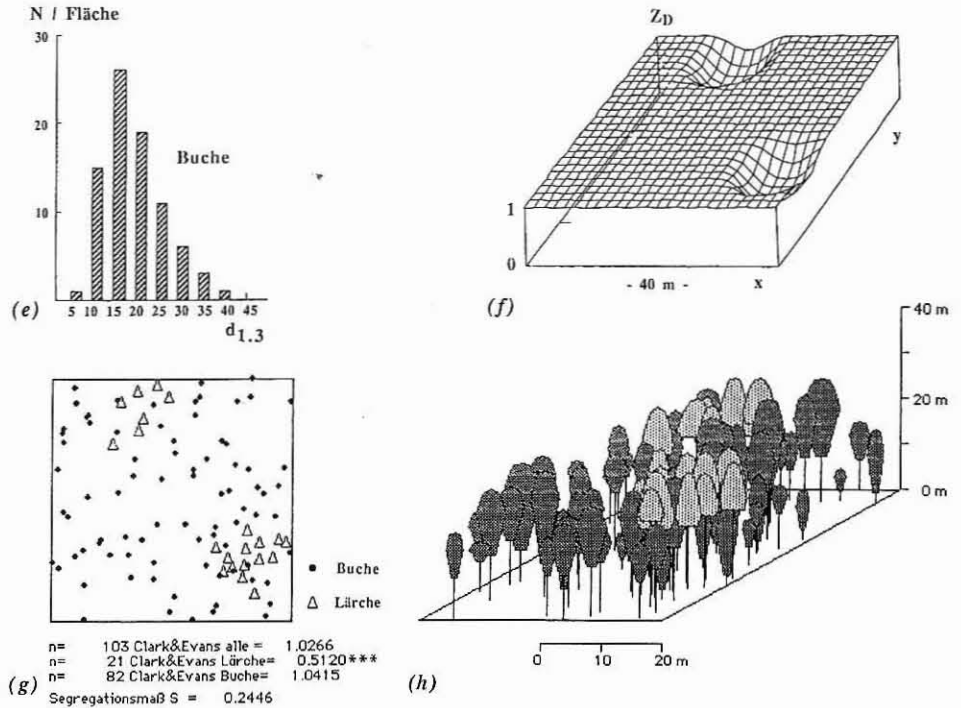


Abb. 10e–h. Generierung der Lärche in Gruppenmischung und der Buche mit mäßiger Durchmischung der Lärche

- (e) Stammzahl-Durchmesserverteilung der Buche, die in einem zweiten Schritt etabliert wird
  - (f) Funktion  $Z_D(x, y)$  zur Erzeugung einer mäßigen Durchmischung der Lärche mit Buche
  - (g) Stammverteilungsplan des generierten Buchen-Lärchen-Mischbestands mit Angabe von Aggregation und Segregation
  - (h) Generierter Buchen-Lärchen-Mischbestand in Seitenansicht
- Fig. 10e–h. Generation of the larch in group mixture and beech and larch in moderate association
- (e) Stem number-diameter distribution of the beech, to be established in a second step
  - (f) Function  $Z_D(x, y)$  in order to generate a moderate association of larches and beeches
  - (g) Stem chart of the generated beech-larch-mixed stand including aggregation and segregation indices
  - (h) Generated beech-larch-mixed stand in side view

Um den Generator einem ersten Brauchbarkeitstest zu unterziehen, wurden alle 53 Versuchsflächen auf Mischungsform (Streifen oder Cluster), Ausdehnung der Mischungseinheiten (Streifenbreite bzw. Clusterdurchmesser in m) und Intensität der Durchmischung (schwache, mäßige, mittlere, starke, sehr starke Durchmischung) angesprochen. Ausgehend von einer solchen Charakterisierung der Mischungskonfiguration wurden mit dem Programm STRUGEN die Strukturen aller 53 Versuchsflächen generiert und die Verteilungsindizes  $R_{L\ddot{a}}$ ,  $R_{Bu}$ ,  $R_{alle}$  und  $S$  der generierten Bestände ermittelt. Der Vergleich zwischen den Strukturindizes der simulierten Bestände und ihren realen Verteilungsindizes gibt Aufschluß über das Abbil-

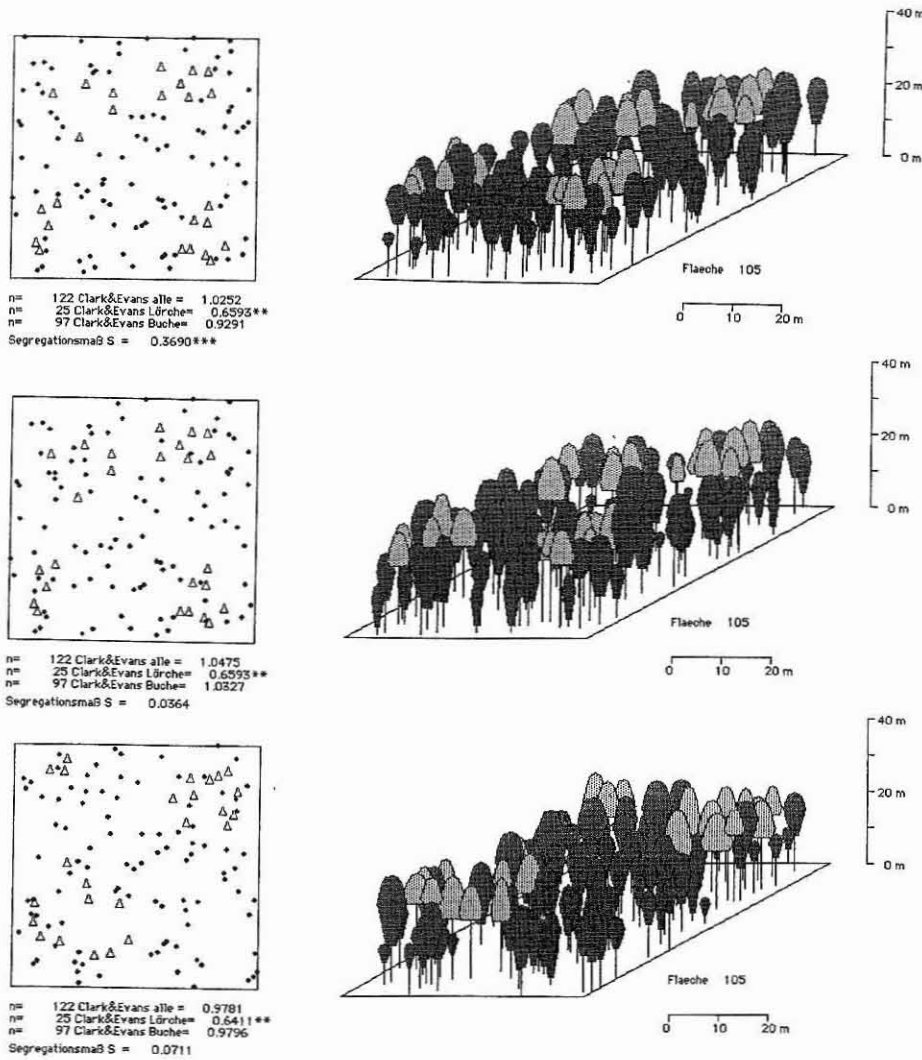


Abb. 11. Stammverteilungspläne und Seitenansichten von Beständen, die mit dem Strukturgenerator STRUGEN erzeugt wurden. Buchen sind dunkelgrau und Lärchen hellgrau dargestellt  
 (oben) Gruppenmischung, bestehend aus vier Lärchengruppen ( $E = 35$ ) mit schwacher Durchmischung der Lärchengruppen  
 (Mitte) Gruppenmischung, bestehend aus vier Lärchengruppen ( $E = 35$ ) mit mittlerer Durchmischung der Lärchengruppen  
 (unten) Trupp- bis Horstmischung, bestehend aus drei Lärchen-Mischungseinheiten ( $E = 10, 35$  und  $90$ ) und mittlerer Durchmischung mit Buchen

Fig. 11. Stem charts and side views of stands generated by the structure generator STRUGEN. Beeches are represented in dark grey and larches are represented in light grey  
 (above) Group mixture, consisting of four larch groups ( $E = 35$ ) with slight association of both species in the larch groups  
 (middle) Group mixture, consisting of four larch groups ( $E = 35$ ) with average association  
 (below) Small to big clusters, consisting of three mixture units of larches ( $E = 10, 35$  and  $90$ ) and average association of both species

dungsverhalten des Generators STRUGEN (Abb. 12). Die eingetragenen simulierten Strukturparameter geben Mittelwerte aus jeweils 10 Generierungsläufen an. Eine solche Wiederholung der Simulationsläufe ist notwendig, weil der Generator mit Zufallszahlen arbeitet und bei jedem Durchlauf ein etwas anderes Ergebnis erbringt (Abb. 13). Bei völliger Übereinstimmung müßten die Wertepaare  $R_{\text{alle}} \text{ wirklich} / R_{\text{alle}} \text{ simuliert}$ ,  $R_{\text{Lä}} \text{ wirklich} / R_{\text{Lä}} \text{ simuliert}$ ,  $R_{\text{Bu}} \text{ wirklich} / R_{\text{Bu}} \text{ simuliert}$  und  $S_{\text{wirklich}} / S_{\text{simuliert}}$  auf den eingezeichneten Winkelhalbierenden liegen. Der Vergleich von Simulation und Realität erbringt bei allen Verteilungsindizes eine tendenzielle Übereinstimmung, die ein relativ wirklichkeitsnahes Abbildungsverhalten anzeigt und sicher weiter verbessert werden kann.

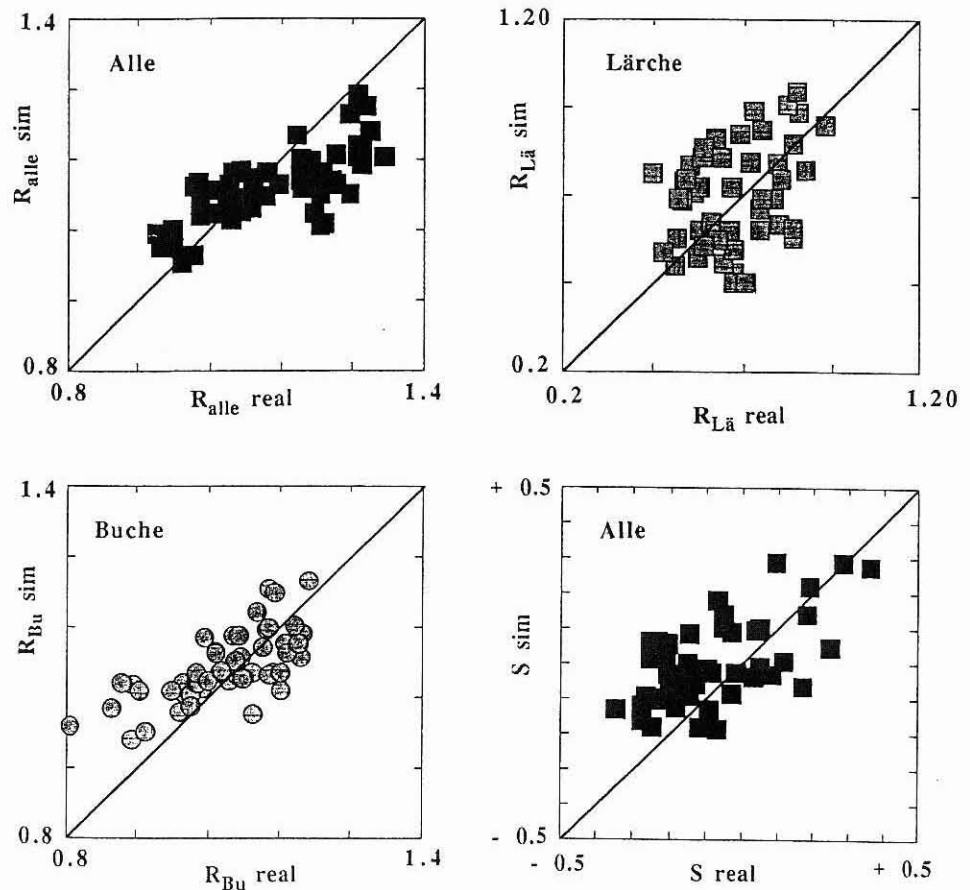
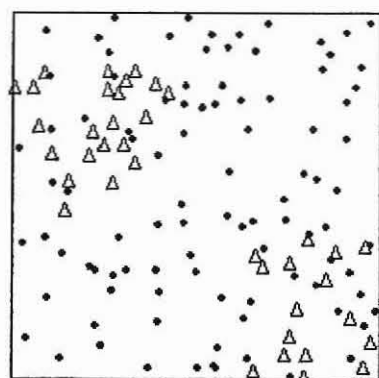
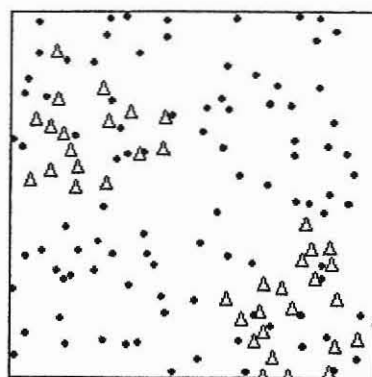


Abb. 12. Vergleich von generierten und wirklichen Bestandesstrukturen. Dargestellt sind die Strukturparameter  $R_{\text{alle}}$ ,  $R_{\text{Lä}}$ ,  $R_{\text{Bu}}$  und  $S$  der generierten Bestände über den wirklichen Strukturparametern. Bei den generierten Strukturparametern handelt es sich jeweils um Mittelwerte aus 10 Simulationsläufen

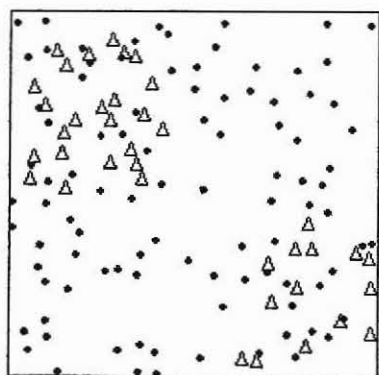
Fig. 12. Comparison of generated and real stand structures. The following parameters are presented: The structural parameters  $R_{\text{alle}}$ ,  $R_{\text{Lä}}$ ,  $R_{\text{Bu}}$ , and  $S$  of the generated stands above the real structural parameters. The generated structural parameters are mean values out of ten simulation runs



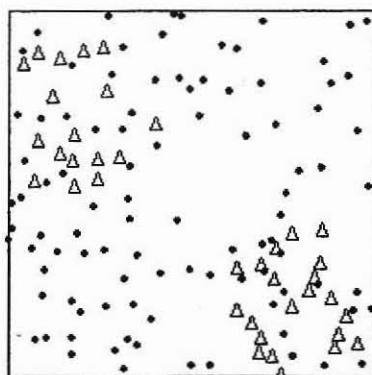
n= 134 Clark&Evans alle = 1.1083\*  
 n= 38 Clark&Evans Lärche= 0.6993\*\*  
 n= 96 Clark&Evans Buche= 1.1574\*\*  
 Segregationsmaß S = 0.1890



n= 134 Clark&Evans alle = 1.1044\*  
 n= 38 Clark&Evans Lärche= 0.6919\*\*\*  
 n= 96 Clark&Evans Buche= 1.1202\*  
 Segregationsmaß S = 0.1013



n= 134 Clark&Evans alle = 1.1304\*\*  
 n= 38 Clark&Evans Lärche= 0.6650\*\*\*  
 n= 96 Clark&Evans Buche= 1.1648\*\*  
 Segregationsmaß S = 0.1463



n= 134 Clark&Evans alle = 1.1488\*\*  
 n= 38 Clark&Evans Lärche= 0.6797\*\*\*  
 n= 96 Clark&Evans Buche= 1.1504\*\*  
 Segregationsmaß S = 0.1367

Abb. 13. Stammverteilungspläne von verschiedenen, zufallsgesteuerten Realisierungen einer Horstmischung, bestehend aus zwei Clustern mit  $E = 90$  und einer mittleren Durchmischung der Lärchen-  
 gruppen mit Buche. Buchen sind als schwarze Kreise und Lärchen als Dreiecke dargestellt (Flächengröße  
 50 m \* 50 m)

Fig. 13. Stem charts for different random realizations of a mixture consisting of two clusters with  $E = 90$   
 and an average association of the larch groups with beeches. Beeches are represented by black circles;  
 larches are represented by triangles (size of the area: 50 metres in length and 50 metres in width)

## 7. Diskussion

Mit der Konstruktion des Generators soll der Weg dazu geebnet werden, abstandsabhängige Einzelbaumwuchsmodelle großflächig einsetzen zu können. Abstandsabhängige Einzelbaummodelle lösen den Bestand in sein Mosaik von Bäumen

auf und modellieren deren Miteinander als dynamisches, räumlich-zeitliches System. Ausgehend von einer Anfangskonstellation zum Zeitpunkt  $t = 0$  erklären sie die Dimensionsentwicklung aller Bäume eines Bestandes aus ihrer individuellen Wuchskonstellation. In ihrer Anwendbarkeit sind positionsabhängige Wachstumsmodelle bisher sehr begrenzt, da sie als Startwerte die Stammfußkoordinaten aller Einzelbäume benötigen, die aber allenfalls auf langfristigen Versuchsflächen oder permanenten Probeflächen der Betriebsinventuren bekannt sind.

Mit dem Generator STRUGEN lassen sich nun auch für Bestände, von denen die Baumverteilung nicht exakt bekannt ist, sondern nur verbal charakterisiert vorliegt, wie das bei der Forsteinrichtung üblich ist, Anfangskonstellationen für einen Modellauf erzeugen, die mit der wirklichen Anfangskonstellation in den dynamikprägenden Merkmalen offensichtlich gut übereinstimmen. Die verbale Ansprache der Mischungsform, z. B. trupp- bis gruppenweisen Mischung, setzt der Generator in ein konkretes Anfangsbild um, mit dem ein nachgeschaltetes Wachstumsmodell seinen Prognoselauf beginnen kann.

Sind von einem fortzuschreibenden Bestand alle Strukturinformationen vorhanden, also auch die Stammfußkoordinaten für den Zeitpunkt  $t = 0$ , so nutzt das Modell selbstverständlich die Originalwerte. Fehlen dagegen die Baumverteilungsdaten und liegt nur eine verbale Charakterisierung der Mischungsform vor, dann fungiert STRUGEN als Datengenerator, d. h. er erzeugt wirklichkeitsnahe Werte, die ein Wachstumsmodell als Startgrößen einsetzt. Indem der Generator beliebige Bestandesstrukturen erzeugt und dem abstandsabhängigen Einzelbaummodell SILVA (Pretzsch, 1992) bereitstellt, das die weitere Bestandesentwicklung als Raum-Zeit-System abbildet, lassen sich mit dem Verbund aus Strukturgenerator und Einzelbaummodell die Effekte der Bestandesstruktur auf die ertragskundlichen, waldbaulichen und ökologischen Parameter der Bestandesentwicklung durchleuchten.

Der angestrebte Brückenschlag von gutachtlich erhobenen Strukturmerkmalen zu Startwerten für hochauflösende Einzelbaummodelle stützt sich zwangsläufig auf einige vorläufige, künftig noch weiter zu untermauernde Methoden. Wichtiger als die methodische Verfeinerung der Teilschritte erschien zunächst die Erarbeitung eines pragmatischen Lösungsweges für die Gesamtaufgabe und die Ausarbeitung einer ersten lauffähigen Programmroutine, in der dieser Brückenschlag (nominal und ordinal skalierte Strukturattribute  $\rightarrow$  Modellstartwerte) EDV-technisch realisiert ist. Nachdem ein erster Lösungsweg vorgezeichnet ist, bieten sich auf einigen Ebenen des Verfahrens Verbesserungsmöglichkeiten an.

1. Grundbausteine für die Generierung des Verteilungsmusters beider Baumarten sind homogene Poisson-Prozesse, die durch die Filter 1 und 3 in inhomogene Poisson-Prozesse umgebildet werden. Weil die erzeugten Punkte nur dann akzeptiert werden, wenn sie bestimmte baumarten- und baumdurchmessertypische Mindestabstände voneinander haben (Filter 2 und 4), entstehen sogenannte hard-core-Prozesse, deren Bezeichnung daher rührt, daß um akzeptierte Bäume eine gewisse Kernzone ganz frei bleibt, außerhalb dieser Zone die Punktdichte  $r$  abrupt ansteigt. Eine scharfe Abgrenzung einer engen Kernzone durch vorgegebene Mindestabstände, in der konkurrenzbedingt keine Nachbarn erwachsen können, von einer weiten Umgebungszone, in der kein Konkurrenzeinfluß besteht, ist sicher weniger wirklichkeitsnah als ein glatter Übergang von einer engen Kernzone gänzlich ohne Konkurrenten (z. B. Bereich des Stammradius) über eine mittlere Zone, in der die gegenseitige Wuchshemmung benachbarter Bäume mit zunehmender Entfernung kontinuierlich abnimmt, bis zu einer Zone, in der kein nachbarschaftlicher Einfluß



mehr zu erwarten ist. Zur Modellierung einer solchen mit zunehmendem Baumabstand allmählich abnehmenden nachbarlichen Konkurrenz und Wuchshemmung (soft core) eignen sich Prozesse mit paarweiser Interaktion, z. B. der in der statistischen Physik angewendete Gibbs-Prozeß, der in STRUGEN implementiert, das jetzt enthaltene hard-core-Prinzip weiter verbessern könnte.

2. STRUGEN eignet sich in seiner jetzigen Version für mehr oder weniger einschichtige Reinbestände und für Mischbestände aus zwei Arten. Durch Hinzunahme von weiteren Filterfunktionen, die die Präsenz von Haupt- und Mischbaumart in verschiedenen Bestandeshöhenschichten steuern, ließe sich STRUGEN auf mehrschichtige Bestände übertragen. Geeignet wären baumartenspezifische Funktionen  $Z_V = f(H_{rel})$ , die die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Haupt- und Nebenbaumart ( $Z_V$  so daß  $0 \leq Z_V \leq 1$ ) für relative Höhengschichten ( $H_{rel} = H/H_{max}$ ) beschreiben und in ihren Funktionsparametern auf Verbalansprachen der Vertikalstruktur aufbauen, wie sie im Rahmen der Forsteinrichtung erfolgen (Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, 1987).

3. STRUGEN benötigt in seiner vorgestellten Version für einen Generierungs- lauf Durchmesser und Baumart aller Bäume einer Testfläche, deren Struktur reproduziert werden soll. Solche Stammzahl-Durchmesser-Frequenzen für Haupt- und Nebenbestand können auf vorhandenen Vollkluppungen, Winkelzählproben oder Probekreis-aufnahmen basieren, wie sie uns zwar schon in großem Umfang, aber noch nicht flächendeckend vorliegen. Um den Generator auch für Bestände mit unbekanntem Stammzahl-Durchmesser-Frequenzen einsetzen zu können, wird STRUGEN künftig eine Programmroutine vorgeschaltet, die auch aus Minimalinformationen, die für fast jeden Bestand vorliegen oder leicht abschätzbar sind (Alter, Mitteldurchmesser, Mittelhöhe und Stammzahl), eine wirklichkeitsnahe Stammzahl-Durchmesser-Verteilung erzeugt und an den Generator STRUGEN als Eingangsgrößen übergibt.

4. Die in der vorliegenden Studie eingesetzten Abstandsverfahren beziehen nur den jeweils nächstgelegenen Nachbarn in die Betrachtung ein und zielen auf die Analyse der nachbarschaftlichen Feintextur. Liegen auf verschiedenen Auflösungsebenen charakteristische Verteilungsmuster vor (z. B. wenn sich ein Bestand aus großen Clustern zusammensetzt, die sich wiederum schachbrettartig aus kleineren Gruppen mit regelmäßiger Verteilung innerhalb der Gruppen aufbauen), so kann das mit der Methode des nächsten Nachbarn nicht hinreichend aufgedeckt werden. Galiano (1982), Ripley (1977) u. a. beschreiben weiterentwickelte Abstandsverfahren, die über die nächsten Nachbarn hinausgehen und auch weiter entfernte in die Betrachtung einbeziehen, und mit denen Aggregation und Segregation künftig auf verschiedenen hierarchischen Auflösungsebenen identifiziert und durch Indizes charakterisiert werden können.

5. Die wichtigsten Schritte zur Anpassung des Generators STRUGEN an Buchen-Lärchen-Mischbestände waren die Herleitung und Parametrisierung der 1 %-Perzentilllinien, die Entwicklung geeigneter Regeln zur Erzeugung von Lage und Ausdehnung der Mischungseinheiten und die Bestimmung der Durchmischungsfunktionen. Der Weg zur Schätzung der Parameter von Punktprozessen aus vorliegenden Verteilungsmustern ist nicht so klar vorgegeben wie etwa beim regressionsanalytischen Ausgleich einer Punktwolke durch eine Gerade. Vielmehr befinden sich Verfahren, mit denen Realisationen von Punktprozessen, die Heterogenität auf verschiedenen Hierarchien aufweisen, mit vertretbarem Aufwand meßtechnisch erfaßt, exakt parametrisiert und in vertretbarer Rechenzeit generiert werden können,

noch in der Entwicklung (Penttinen et al., 1992; Ripley, 1981; Stoyan, 1987; Tomppo, 1986). Nach diesen Untersuchungen bieten Abstandsverfahren, auf denen STRUGEN basiert, die größte Aussicht, daß mit ihnen die meßtechnische Erfassung von Verteilungsstrukturen, die statistische Bestimmung der Verteilungsparameter für die verschiedenen Teilprozesse und die modellhafte Rekonstruktion der beobachteten Verteilung künftig nach einem einheitlichen Verfahren erfolgen können. Nach Maßgabe neuer Erkenntnisse können einzelne Bausteine die bisher eher pragmatisch konzipiert wurden, künftig durch bessere Lösungswege ersetzt werden, ohne daß der gesamte Generator neu konstruiert werden muß.

### 8. Danksagung

Daß die Studie am Beispiel niedersächsischer Buchen-Lärchen-Mischbestände ausgeführt werden konnte, verdanken ich dem Leiter des Forstamtes Lüß, Herrn Forstoberrat Dr. M. Dippel, der das zugrundeliegende Datenmaterial im Rahmen seiner Dissertation erfaßt hat, und dem Leiter des Göttinger Waldbauinstituts I, Herrn Prof. Dr. B. von Lüpke, der es mir für die Untersuchung überließ. Herrn Prof. Dr. H. D. Quednau vom Lehrstuhl für Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der Universität München sei für wichtige Literaturhinweise und Herrn Forstdirektor Dr. H. Spellmann, Leiter der Abteilung Waldwachstum an der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, für zahlreiche lebhaft Diskussionsgedankt.

### Literatur

- Altenkirch, W., 1982: Ökologische Vielfalt – ein Mittel natürlichen Waldschutzes? *Der Forst- und Holzwirt*, 37. Jg., H. 8, S. 211–217.
- Arbeitskreis forstliche Landespflege (Hrsg.), 1984: *Biotop-Pflege im Wald, Ein Leitfaden für die forstliche Praxis*, Kilda-Verlag, 230 S.
- Assmann, E., 1953/1954: Die Standraumfrage und die Methodik der Mischbestandsuntersuchungen, *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 125. Jg., H. 5, S. 149–153.
- Blab, J., 1986: Grundlagen des Biotopschutzes für Tiere. Ein Leitfaden zum praktischen Schutz der Lebensräume unserer Tiere, Kilda-Verlag, Bonn, Bad Godesberg, 257 S.
- Clark, Ph. J. und Evans, F. C., 1954: Distance to nearest Neighbor as a measure of spatial relationships in populations, *Ecology*, Vol. 35, No. 4, S. 445–453.
- Dippel, M., 1988: Wuchsleistung und Konkurrenz von Buchen/Lärchen-Mischbeständen im Südniedersächsischen Bergland, Diss., Forstwiss. Fachber., Univ. Göttingen, 337 S.
- Donnelly, K., 1978: Simulation to determine the variance and edge-effect of total nearest neighbour distance, S. 91–95 in: *Simulation methods in archaeology*, Hodder, I. R. (Hrsg.), Cambridge University Press, London.
- Ellenberg, H. et al., 1985: Über Vögel in Wäldern und die Vogelwelt des Sachsenwaldes, *Hamb. Avifaun. Beitr.*, Bd. 20, S. 1–50.
- von Gadow, K., 1993: Zur Bestandesbeschreibung in der Forsteinrichtung, *Forst und Holz*, 48. Jg., H. 21, S. 602–606.
- Galiano, E. F., 1982: Pattern detection in plant populations through the analysis of plant-to-all-plants distances, *Vegetatio*, Bd. 49, S. 39–43.
- Haber, W., 1982: Was erwarten Naturschutz und Landschaftspflege von der Waldwirtschaft?, *Schriftenreihe des Deutschen Rates für Landespflege*, H. 40, S. 962–965.
- Kramer, W., 1987: Zum Anbau der Buche mit Europäischer Lärche auf Freiflächen, *Der Forst- und Holzwirt*, 42. Jg., H. 19, S. 527–529.

- Lepš, J. und Kindlmann, P., 1987: Models of the development of spatial pattern of an even-aged plant population over time, *Ecological Modelling*, Vol. 39, S. 45–57.
- Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.), 1987: Anweisung zur Betriebsregelung (Forsteinrichtung) in den Niedersächsischen Landesforsten (B.A.87), 35 S.
- Pielou, E. C., 1975: *Ecological diversity*, John Wiley & Sons.
- Pielou, E. C., 1977: *Mathematical Ecology*, John Wiley & Sons, 385 S.
- Penttinen, A., Stoyan, D. und Henttonen, H. M., 1992: Marked point processes in forest statistics, *Forest Science*, Vol. 38, H. 4, S. 806–824.
- Pretzsch, H., 1992: Konzeption und Konstruktion von Wuchsmodellen für Rein- und Mischbestände, *Forstl. Forschungsber. München*, Nr. 115, 358 S.
- Pretzsch, H., 1993: Analyse und Reproduktion räumlicher Bestandesstrukturen. Versuche mit dem Strukturgenerator STRUGEN, *Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Nieders. Forstl. Versuchsanstalt*, Band 114, Sauerländer's Verlag, 87 Seiten.
- Ripley, B. D., 1977: Modelling spatial patterns, *J. Roy. Stat. Soc., Series B*, Vol. 39, No. 2, S. 172–192 und Diskussion 192–212.
- Ripley, B. D., 1981: *Spatial Statistics*, John Wiley & Sons.
- Stoyan, D., 1987: Statistical analysis of spatial point processes: A soft-core model and cross-correlations of marks, *Biometrical Journal*, 29. Jg., S. 971–980.
- Tomppo, E., 1986: Models and methods for analysing spatial patterns of trees, *Communications Instituti Forestalis Fenniae*, Nr. 138, 65 S.
- Upton, G. J. G. und Fingleton, B., 1985: *Spatial data analysis by example, Volume I: Point pattern and quantitative data*, John Wiley & Sons, 410 S.
- Upton, G. J. G. und Fingleton, B., 1989: *Spatial data analysis by example, Volume II: Categorical and directional data*, John Wiley & Sons, 416 S.

*Anschrift des Verfassers:* Prof. Dr. Hans Pretzsch, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Ludwig-Maximilians-Universität München/Freising, Hohenbachernstraße 22, D-85354 Freising, Bundesrepublik Deutschland

Eingelangt: Jänner 1995