

Sonderdruck aus
Forstwissenschaftliches Centralblatt

104. Jahrgang (1985), Heft 1. S. 49-61

Alle Rechte, auch die der Übersetzung des Nachdrucks, der photomechanischen Wiedergabe und Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, vorbehalten.
© 1985 Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin

Das Wachstum von *Pinus pinaster* (Aiton) in Abhängigkeit vom Standraum

Von A. VAN LAAR

Einleitung

Pinus pinaster Aiton (*P. maritima* Poiret) ist eine raschwüchsige zweinadlige Kiefernart der mediterranen Küstengebiete. Das natürliche Verbreitungsgebiet liegt zwischen dem 31. und 46. Breitengrad; es erstreckt sich von der französischen Atlantikküste im Westen bis zur italienischen Adria. Es gibt einzelne Vorkommen in Zentralspanien, Algerien und Marokko. In Portugal und Frankreich kommt *P. pinaster* von Meeresniveau bis in Höhenlagen von 900 m vor, in Spanien wächst sie noch in 1200 m Höhe. Optimale Standorte für *P. pinaster* gibt es in Südfrankreich und im Atlasgebirge Nordafrikas. Für die künstliche Verbreitung in Südafrika haben sich Standorte innerhalb der Thornthwaite'schen B 4 Humiditätszone als klimatisch günstig erwiesen (Thornthwaite 1948).

In der südlichen und südwestlichen Kapprovinz Südafrikas war *P. pinaster* für die dort von staatlicher Seite zwischen 1910 und 1940 durchgeführten Erstaufforstungen eine der wichtigsten Baumarten. Anfangs wurden die in Europa zu jener Zeit üblichen Pflanzverbände angewendet. Sie erwiesen sich als zu eng und wurden allmählich auf 2,7×2,7 m erweitert. CRAIB (1939) hat für ärmere Standorte einen Pflanzverband von 3,6×3,6 m vorgeschlagen. Er konnte

U.S. Copyright Clearance Center Code Statement:
Forstw. Cbl. 104 (1985), 49-61
© 1985 Verlag Parey, Hamburg und Berlin
ISSN 0015-8003 / InterCode: FWSCAZ

0015-8003/85/10401-0049 \$ 0.25/0

sich jedoch damals nicht durchsetzen. *P. pinaster* wird in Südafrika in einer Umtriebszeit von 35 bis 40 Jahren bewirtschaftet. Die Durchforstungen werden im Alter 8, 13 und 18 ausgeführt.

Zur Ermittlung der optimalen Bestockungsdichte entwarf O'CONNOR (1935) ein Versuchskonzept, das in der forstlichen Literatur als Correlated Curve Trend (CCT) beschrieben wird (O'CONNOR 1935). Das Konzept wurde in *P. pinaster*-Verbandsversuchen realisiert, 1937 in Lottering, 1939 in Houwhoek. Lottering liegt in der südlichen Kapprovinz, 23°47' östlicher Länge und 34°2' südlicher Breite. Hier, in einem schmalen Küstenstreifen, sind die Niederschläge gleichmäßig über das ganze Jahr verteilt. Houwhoek liegt in der westlichen Kapprovinz, 19°02' östlicher Länge, und 34°09' südlicher Breite. In diesem Gebiet herrscht mediterranes Klima mit trockenen Sommern und regenreichen Wintern. Tabelle 1 gibt die Daten der monatlichen Niederschläge und Durchschnittstemperaturen wieder.

Tabelle 1

Monatlicher Niederschlag und durchschnittliche Temperatur im kältesten ($\bar{T}_{\min.}$)
und im wärmsten ($\bar{T}_{\max.}$) Monat

Monthly precipitation, and average temperature of the coldest ($\bar{T}_{\min.}$) and the warmest ($\bar{T}_{\max.}$) month

	Niederschlag (mm)												Total	$\bar{T}_{\min.}$ (°C)	$\bar{T}_{\max.}$ (°C)
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D			
Houwhoek	30,2	26,4	34,0	73,2	113,8	162,6	144,5	126,5	111,3	68,6	55,6	29,2	976	9,6	19,3
Lottering	94,8	93,0	100,6	78,7	93,6	73,4	75,0	85,2	116,3	109,9	99,3	112,5	1125	7,4	15,2

Versuchsbeschreibung

Ziel des CCT-Versuches ist die Optimierung von Pflanzenverband und Durchforstungsstärke. O'CONNOR ging von der stochastischen Beziehung zwischen dem Erntevolumen des einzelnen Baumes und dem verfügbaren Standraum aus, unter Berücksichtigung der Standortfaktoren. Er nahm an, daß das Wachstum einer Baumart in durchforsteten Beständen zunächst durch die Standortfaktoren bestimmt wird. Für Wachstumskurven und durchforsteter Bestände dagegen nahm er einen sehr frühen Einfluß der Faktoren Baumart, Bestandesdichte und Standort an. Der CCT-Versuch umfaßt zwei Gruppen von Versuchsflächen. Die erste Gruppe besteht aus acht typischen Verbandsflächen. Fläche Nr. 1 bleibt unbehandelt, die Ausgangsbaumzahl beträgt 3000 Pflanzen/ha. Auf den Flächen Nr. 2 bis Nr. 8 werden Stammzahlreduktionen jeweils vor Auftreten von Wurzelkonkurrenz durchgeführt, um im Laufe der Zeit die bei der Begründung des Versuchs geplante Baumzahlstaffelung auf den einzelnen Flächen zu erreichen. Tabelle 2 gibt die geplanten Baumzahlen der Versuchsflächen in Houwhoek und Lottering wieder.

Tabelle 2

Staffelung der im Versuch getesteten Baumzahlen und Zeitpunkt der letzten Baumzahlreduktion
Number of trees tested in the trial in steps, and timing of last stem number reduction

Fläche	Houwhoek		Lottering	
	N/ha	Alter	N/ha	Alter
1	2966	—	2942	—
2	1483	3.0	1483	2.9
3	989	4.1	989	3.2
4	741	4.9	741	4.1
5	494	6.3	494	4.7
6	371	8.1	371	5.7
7	247	9.6	247	6.8
8	99	13.9	87	9.1

In einer zweiten Gruppe von je 10 Flächen pro Versuch sollte der Einfluß unterschiedlich stark durchgeführter Durchforstungen in verschiedenen Altern auf das Wachstum der Einzelbäume untersucht werden. Die Stammzahlreduktionen sollten zum Zeitpunkt beginnender Wurzelkonkurrenz erfolgen. Als Idealfall waren für jede Behandlung mehrere Wiederholungen vorgesehen.

Mortalität, S %-Indexwert und maximale Grundfläche

An Hand der Daten des Houwhoek-Versuches für das Alter 34 und der Daten des Lottering-Versuches für die Alter 34 und 44 wurde die kumulative Mortalität jeder Fläche (N_s) regressionsanalytisch untersucht. Die Gleichungen lauten:

$$\text{Houwhoek, Alter 34: } N_s = 3,3 - 0,000066 N^2 \quad R^2 = 0,977$$

$$\text{Lottering, Alter 34: } N_s = -14,9 + 0,0203 N + 0,000135 N^2 \quad R^2 = 0,997$$

$$\text{Lottering, Alter 44: } N_s = -54,9 + 0,2182 N + 0,000130 N^2 \quad R^2 = 0,996$$

Die Mortalitätskurven sind in Abbildung 1 aufgezeichnet.

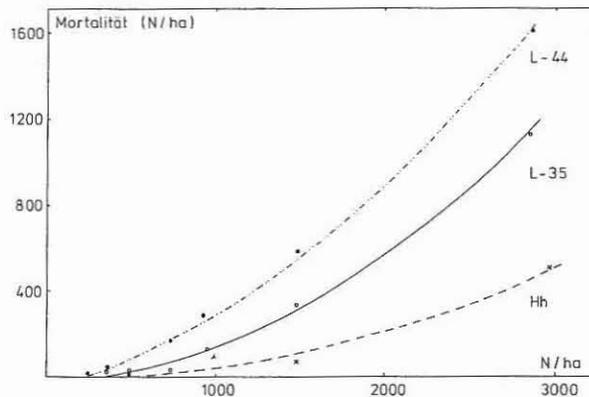


Abb. 1. Zusammenhang zwischen Anfangsbaumzahl je Hektar und Mortalität

Fig. 1. Relationship between initial number of trees per hectare and mortality

Die Unterschiede zwischen den Regressionskoeffizienten der Kollektive Houwhoek Alter 34 und Lottering Alter 34 sowie zwischen Lottering Alter 34 und Lottering Alter 44 wurden kovarianzanalytisch geprüft. Damit sollte zugleich die Hypothese geprüft werden, daß sich linearer Anstieg sowie Kurvilinearität nicht unterscheiden. Daraus ergaben sich die F-Werte 66 und 128 (2 und 8 FG). Die Heterogenität der Regressionskoeffizienten war deshalb hochsignifikant.

ASSMANN (1961) hat die maximale Grundfläche als die jeweils standörtlich höchste Grundfläche lebender Bäume je Hektar definiert. Die maximale Grundfläche eines Bestandes ist altersabhängig. Man kann vermuten, daß die Zuwachsrates der maximalen Grundfläche mit zunehmendem Alter gleichförmig abnimmt. In der Zerfallsphase eines Bestandes verringert sich die maximale Grundfläche schließlich infolge des Absterbens der einzelnen Bäume.

Die Lottering-Flächen wurden bis zu dem relativ hohen Alter von 44 Jahren gemessen und ermöglichen das Schätzen der maximalen Grundfläche. Für die Abhängigkeit der Grundfläche vom Alter ergaben sich für die Lottering-Flächen Nr. 1 und Nr. 2 folgende Beziehungen:

$$\text{Lottering 1: } G(\text{m}^2/\text{ha}) = -8146 + 5,391 (\text{Alter}) - 0,0759 (\text{Alter})^2 \quad R^2 = 0,982$$

$$\text{Lottering 2: } G(\text{m}^2/\text{ha}) = -14,55 + 4,931 (\text{Alter}) - 0,0626 (\text{Alter})^2 \quad R^2 = 0,988$$

Die mit Hilfe der Gleichungen geschätzten Höchstwerte der Grundfläche betragen 87,6 m^2/ha und 82,6 m^2/ha . Sie wurden in den Altern von 35 Jahren bzw. 39 Jahren erreicht. Zur Schätzung der wirklichen, altersabhängigen maximalen Grundflächenhaltung vor Erreichen ih-

res Höchstwertes konnten die Versuchspartzen nicht verwendet werden. Der Versuch Houwhoek wurde im Alter 34 abgebrochen. Die Schätzung der Höchstwerte der maximalen Grundfläche beruht auf einer Extrapolation. Die Beziehungen lauten:

$$\text{Houwhoek 1: } G(\text{m}^2/\text{ha}) = -7,28 + 4,067 (\text{Alter}) - 0,05162 (\text{Alter})^2 \quad R^2 = 0,998$$

$$\text{Houwhoek 2: } G(\text{m}^2/\text{ha}) = -7,66 + 3,462 (\text{Alter}) - 0,04135 (\text{Alter})^2 \quad R^2 = 0,999$$

Die Höchstwerte der Grundfläche wären im Alter 38 bis 39 erreicht worden und hätten 72,8 m²/ha bzw. 63,9 m²/ha betragen. In beiden Versuchen zeigen die Flächen Nr. 1 höhere Grundflächenmaxima als die Flächen Nr. 2. Dies deutet darauf hin, daß die altersabhängige Mortalität einsetzt, bevor der standortsabhängige Höchstwert der Grundfläche erreicht wird. Dies gilt wohl in erster Linie für die Flächen Nr. 2, könnte aber auch an beiden Versuchsorten auf die Flächen Nr. 1 zutreffen.

Das Hart-Becking S % eines Bestandes wird definiert als der durchschnittliche Baumabstand a, ausgedrückt als Prozentwert der Bestandesoberhöhe. Zur Berechnung des Baumabstandes a wird von einem systematisch bestockten Wald ausgegangen. Für den Versuch Lottering ist der Zusammenhang zwischen S % und Alter in den Flächen Nr. 1 und Nr. 2 folgender (s. auch Abb. 2):

$$\text{Lottering 1: } S \% = 46,56 + 10,170 (\text{Alter})^{1/2} - 27,689 \ln (\text{Alter}) \quad R^2 = 0,998$$

$$\text{Lottering 2: } S \% = 62,78 + 11,192 (\text{Alter})^{1/2} - 33,4738 \ln (\text{Alter}) \quad R^2 = 0,998$$

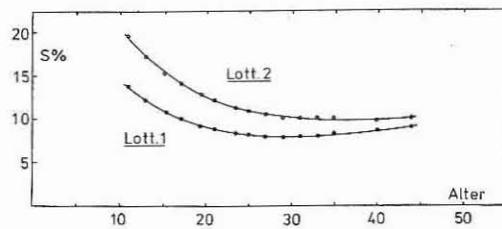


Abb. 2. Zusammenhang zwischen S % und Alter in den Flächen 1 und 2, Versuch Lottering

Fig. 2. Relationship between S % and age on plots 1 and 2, Lottering trial

Der S %-Indexwert erreicht in Fläche Nr. 1 des Lottering-Versuches im Alter 29 ein Minimum von 8,1 und steigt als Folge des Absterbens einzelner Bäume wieder an. Die Fläche Nr. 2 weist im Alter 37 ein Minimum von 10,0 auf. Ein ähnlicher Trend wurde in den bayerischen Fichtenversuchen festgestellt (ASSMANN 1960).

Der weite Pflanzenverband der Flächen 8 an beiden Versuchsorten sollte den lebenden Bäumen ein freies Wachstum ermöglichen. Theoretisch wurde die Stammzahlreduktion vor Eintreten von Wurzelkonkurrenz durchgeführt. Das zum Zeitpunkt der Baumzahlreduktion beobachtete S % ist vom Bestandesalter im Jahr dieser Durchforstung unabhängig ($r = 0,183$, bzw. $r = 0,224$). Die Mittelwerte sind 58,2 bzw. 60,9; der Unterschied ist nicht gesichert. Das S %, das bei der Wurzelkonkurrenz einsetzt, beträgt daher annähernd 60.

Im Versuch Houwhoek besteht zwischen Baumzahl und S % im Alter 34 folgende Abhängigkeit:

$$\ln (S \%) = -2,56 + 52,1612 (\ln N)^{-1} - 107,597 (\ln N)^{-2}$$

Die Regressionsgleichung für die Lottering-Flächen, Alter 44, lautet wie folgt:

$$\ln (S \%) = 14,36 - 10,109 \ln N + 2,025 (\ln N)^2$$

Daraus lassen sich für die Flächen Nr. 8 folgende Schätzwerte ableiten:

$$\text{Houwhoek, Alter 34 : } S \% = 44,3$$

$$\text{Lottering, Alter 44 : } S \% = 32,1$$

Der weiteste Verband hat also kein freies Wachstum der einzelnen Bäume bewirkt. Die Oberhöhe im Lottering-Versuch im Alter von 44 Jahren betrug 33,5 m. Bei einem S % von 60 hätte der mittlere Abstand zwischen den Bäumen 20,1 m betragen sollen, um freies Wachstum der einzelnen Bäume zu ermöglichen. Das hätte eine Baumzahl von 25 je Hektar bedeutet.

Höhenwachstum

Die Chapman-Richards-Wachstums Gleichung wurde für den Ausgleich der als Zeitreihe beobachteten Mittelhöhen verwendet. Die Gleichung, die nichtlinear und ebenfalls nicht linearisierbar ist, wurde bereits zahlreiche Male in der Waldwachstumskunde verwendet. (TURNBULL u. PIENAAR 1973; RAWAT u. FRANZ 1974; VAN LAAR 1978, 1981; OLIVEIRA 1980). Die Funktion lautet:

$$H_m = A(1 - b \times \exp[-k \times \text{Alter}])^{1/(1-m)}$$

wobei A, b, k und m – Parameter der Gleichung. Die Mittelhöhe nähert sich dem Wert A für $\text{Alter} \rightarrow \infty$ und stellt damit einen Asymptotenwert dar. Eine graphische Aufarbeitung des Datenmaterials läßt die Annahme zu, daß $m = 0$, wenn die Voraussetzung zutrifft, daß der Geltungsbereich über dem Alter von 3 Jahren liegt. Durch eine Umformung der Wachstumsgleichung wird die Schätzung der Parameter A, b und k mit Algorithmen der nichtlinearen Regression ermöglicht. Die Umformung lautet:

$$Y = \alpha + \beta \gamma \text{Alter}$$

wobei $Y = H_m^{1-m}$, $\alpha = A$, $\beta = -Ab$, $\gamma = \exp(-k)$

Das Programm BMDP3R wurde zur Schätzung der Parameter α , β und γ verwendet. Die damit übereinstimmenden Parameterwerte der Chapman-Richards-Gleichung wurden für jede einzelne Versuchspartizelle berechnet. Der Parameter A ist die standortsabhängige Enddimension der Wachstumsvariablen (z. B. Höhe, Durchmesser, Grundfläche) und stellt damit den wichtigsten Parameter dar, während der Parameter k die Zuwachsrate erfaßt. Zwischen der Mittelhöhe im Alter des Wendepunktes und m besteht folgende Abhängigkeitsbeziehung:

$$H_m = A_m^{1/(1-m)}$$

Die Annahme $m = 0$ führt zu einer Degeneration der Wachstumsfunktion. Die Zuwachsrate nimmt dann monoton mit dem Alter ab. Die Annahme $m = 2$ ergibt die logistische Funktionsgleichung, während sich die Gleichung der Gompertsfunktion nähert, wenn m den Wert 1 anstrebt.

Eine Regressionsanalyse für die beiden Versuche mit A als abhängiger und der Anfangsbaumzahl als unabhängiger Variablen ließ keinen gesicherten Zusammenhang zwischen beiden Variablen erkennen. Die Hypothese, daß der Endwert der Mittelhöhe nicht zu der Anfangs-

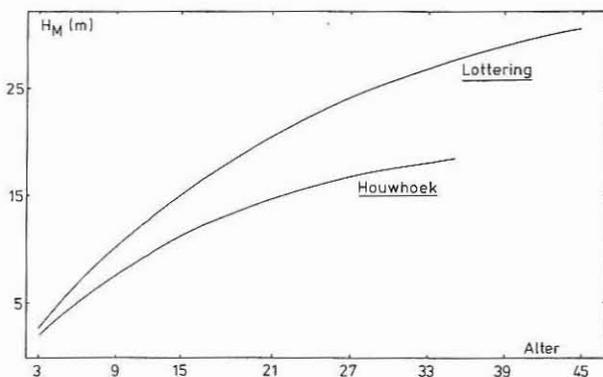


Abb. 3. Entwicklung der Mittelhöhen in den Versuchen Houwhoek und Lottering

Fig. 3. Development of mean heights in the Houwhoek and Lottering trials

baumzahl in Beziehung steht, konnte deswegen nicht abgelehnt werden. Das gesamte Datenmaterial der 8 Flächen in den beiden Versuchen wurde deswegen zusammengefügt zur Erfassung einer einzigen Wachstumsgleichung für jeden Versuch. Die Gleichungen lauten:

$$\text{Versuch Houwhoek: } H_m = 21,60 (1 - 1,10746 \exp [-0,0578 \times \text{Alter}])$$

$$\text{Versuch Lottering: } H_m = 36,54 (1 - 1,0481 \exp [-0,04146 \times \text{Alter}])$$

Die Gleichungen lassen einen ausgeprägten Bonitätsunterschied erkennen (Abb. 3).

Grundflächenentwicklung

Die Chapman-Richards-Gleichung wurde auch zur Ausgleichung der lebenden Grundfläche über dem Alter verwendet, wobei allerdings von der Annahme ausgegangen wird, daß sich die Grundfläche der lebenden Bäume mit zunehmendem Alter einem Endwert nähert und kein Maximum aufweist. Diese Annahme dürfte nur zu einem bestimmten, von der Bestandesdichte abhängigen Alter der Fall sein.

Das BMDP-Programm für die nichtlineare Regression erlaubt die gleichzeitige Schätzung der 4 Parameter der Chapman-Richards-Gleichung, aber dadurch wurden Parameterwerte erhalten, die in keiner Abhängigkeit zur Anfangsbaumzahl standen. Entweder Meßfehler oder wetterbedingte Einflußfaktoren haben eine Unsicherheit bei der Schätzung des Parameters m hervorgerufen.

Die aus Iterationen berechneten m -Werte schwankten erheblich. Der Interkorrelationen zwischen den Parameterschätzwerten wegen rief diese Schwankung Zufallsstreuungen bei der Schätzung der übrigen Parameter hervor. Für die Berechnung der Parameterwerte wurde deswegen ein HP-85 Mikrocomputer verwendet. Für jede Versuchsfläche wurde eine Reihe von Interaktionen mit schrittweiser Zunahme des Parameters m durchgerechnet und für jeden m -Wert die Residualstreuung ermittelt. Daraus konnte geschlossen werden, welche m -Werte eine akzeptable Anpassung der Wachstumskurve an das Datenmaterial ergeben würden. Grundsätzlich wurden diejenigen m -Werte zur weiteren Analyse verwendet, die die geringste Residualstreuung aufwiesen. Jedoch waren in einigen Fällen die optimalen m -Werte Ausreißer im Kollektiv der berechneten m -Werte.

Die sich ergebenden m -Werte sind:

Fläche	Houwhoek	Lottering
1	0	0,05
2	0,05	0,15
3	0,10	0,20
4	0,15	0,20
5	0,15	0,25
6	0,15	0,30
7	0,20	0,35
8	0,35	0,40

Der nächste Schritt war eine Regressionsanalyse mit A bzw. k als abhängiger, N/ha als unabhängiger Variablen. Aus einer Anzahl von Modellen erwiesen sich folgende Gleichungen als diejenigen mit der geringsten Residualstreuung:

$$\text{Houwhoek: } A = -449,191 + 217,402 \ln (\ln N) + 671,893 (\ln N)^{-1}$$

$$k = -0,1499 + 0,08171 \ln (\ln N) + 0,31509 (\ln N)^{-1}$$

$$\text{Lottering: } A = -149,157 + 61,6816 \ln N - 3,8895 (\ln N)^2$$

$$k = 0,0688 - 0,02047 \ln N + 0,002743 (\ln N)^2$$

Zum Ausgleich der Grundflächenwerte im jungen Alter wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt mit N/ha als unabhängiger und der Grundfläche/ha im Alter 3 als abhängiger Variabler. Die daraus resultierenden Gleichungen waren:

Houwhoek: $G = 1,237 - 0,542 \ln N + 0,060367 (\ln N)^2$

Lottering: $G = 3,068 - 1,2872 \ln N + 0,1415 (\ln N)^2$

Die einzelnen Wachstumskurven wurden durch den Erwartungswert der Grundfläche im Alter 3 gezwungen. Daraus errechnet sich für die i -te Fläche der Parameter b_i :

$$b_i = (1 - \frac{G_i^{1-m_i}}{A_i}) / \exp(-3k_i)$$

wobei $G_i = f(\text{Alter})$, $A_i = f(N)$ und $k_i = f(N)$

Die daraus berechneten b -Werte wurden regressionsanalytisch über die Baumzahl ausgeglichen:

Houwhoek: $b = 1,093 + 0,006075 \ln N + 0,0006721 (\ln N)^2$ $R^2 = 0,9999$

Lottering: $b = 1,190 - 0,05835 \ln N + 0,0080615 (\ln N)^2$ $R^2 = 0,9990$

Abbildung 4 zeigt die sich aus dem Ausgleichsverfahren ergebenden Wachstumskurven.

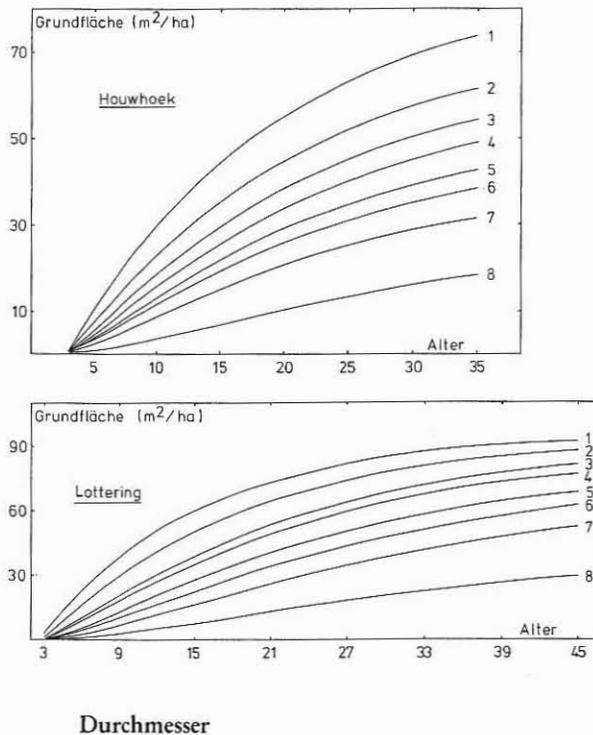


Abb. 4. Grundflächenentwicklung in den Versuchen Houwhoek und Lottering
 Fig. 4. Basal area development in the Houwhoek and Lottering trials

Durchmesser

Der Mitteldurchmesser wird entscheidend von der Bestandesdichte, dem Alter und dem Standort beeinflusst. Der Mitteldurchmesser jeder Versuchsfläche wurde über das Alter ausgeglichen. Der Wendepunkt der Wachstumskurven liegt unter dem Alter der ersten Aufnahme. Deshalb wurde der Parameter m in der Chapman-Richards-Gleichung gleich Null gesetzt. Aus diesem Grunde nimmt der Durchmesserzuwachs ab Alter 3 monoton ab. Die im vorhergehenden Ab-

schnitt genannte Wachstumsfunktion wurde auch zur Erfassung der Durchmesserentwicklung verwendet. Die Beziehungen zwischen dem Parameter A und der Anfangsbaumzahl sowie dem Parameter k und der Baumzahl lauten:

$$\text{Houwhoek: } A = -26,165 - 0,3981 \ln N + 386,9647 (\ln N)^{-1} \quad R^2 = 0,994$$

$$k = -0,1828 + 0,0776 \ln N - 0,005329 (\ln N)^2 \quad R^2 = 0,951$$

$$\text{Lottering: } A = 264,28 - 57,315 \ln N + 3,5615 (\ln N)^2 \quad R^2 = 0,993$$

$$k = -0,2463 + 0,09955 \ln N - 0,00802 (\ln N)^2 \quad R^2 = 0,833$$

Auch zur Erfassung der Durchmesserentwicklung wurde für die Schätzung des Parameters b der Chapman-Richards-Gleichung eine Restriktion eingeführt. Es wurde angenommen, daß die Wertepaare Alter und Mitteldurchmesser zum Zeitpunkt der ersten Baumzahlreduktion eine Zufallsstichprobe aus einer Population freiwachsender Baumkollektive darstellen. Die so erhaltenen Stichproben mit 8 Meßwerten je Versuch wurden regressionsanalytisch ausgeglichen. Aus der Regressionsanalyse wurde für jede Fläche ein Schätzwert für den Mitteldurchmesser zum Zeitpunkt des Auftretens von Wurzelkonkurrenz abgeleitet. Mit Hilfe dieser Schätzwerte wurden die Wachstumskurven für die einzelnen Versuchsflächen konstruiert. Diese Unsicherheit wurde durch standörtliche Unterschiede erhöht. Die Schätzwerte für den Mitteldurchmesser wurden regressionsanalytisch mit dem Alter als unabhängiger und dem DBH als abhängiger Variable ausgeglichen:

$$\text{Houwhoek: } \text{BHD} = -4,15 + 2,321 (\text{Alter})$$

$$\text{Lottering: } \text{BHD} = -5,35 + 3,211 (\text{Alter} - 0,0439 (\text{Alter})^2)$$

Die sich daraus ergebenden Schätzwerte für den Parameter b wurden regressionsanalytisch über die Anfangsbaumzahl ausgeglichen:

$$\text{Houwhoek: } b = 2,9806 - 0,14614 \ln N - 5,1807 (\ln N)^{-1} \quad R = 0,660$$

$$\text{Lottering: } b = 2,2434 - 0,0985 \ln N - 3,3817 (\ln N)^{-1} \quad R = 0,770$$

Die Wachstumskurven sind in Abbildung 5 aufgezeichnet.

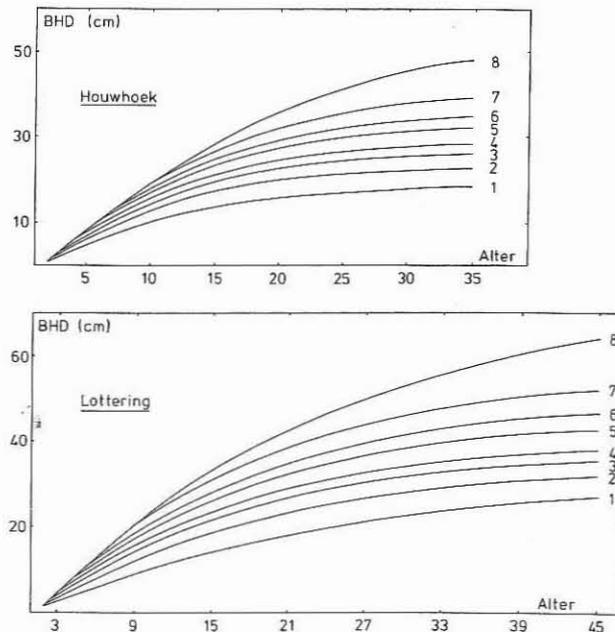


Abb. 5. Durchmesserentwicklung in den Versuchen Houwhoek und Lottering
Fig. 5. Diameter development in the Houwhoek and Lottering trials

Volumenzuwachs

Zunächst wurde versucht, die Wachstumskurven für den Volumenzuwachs mit den Grundflächenwachstumskurven in Einklang zu bringen. Für jede Versuchsfläche wurde eine Regressionsanalyse durchgerechnet, mit den in verschiedenen Altern beobachteten Grundflächen je Hektar, der Mittelhöhe und deren linearen Interaktion als erklärenden Variablen. Die Gleichung lautet wie folgt:

$$V = c_v + b_1 (G - c_g) + b_2 (H - c_h) + b_3 (G - c_g) (H - c_h)$$

wobei b_1, b_2, b_3 = Regressionskoeffizienten,

c_g, c_h, c_v = Volumen-, bzw. Grundflächen- und Höhenrestriktion

Die Grundflächenrestriktion wurde berechnet aus einer Regressionsgleichung mit der Grundfläche/ha im Alter 3 des verbleibenden Bestandes, d. h. des Bestandes nach der letzten Baumzahlreduktion als abhängiger und der Baumzahl je Hektar als unabhängiger Variablen. Die Abhängigkeitsbeziehung zwischen dieser Grundfläche und $\log(N)$ ist linear. Die Höhenrestriktion wurde aus der Höhenwachstumskurve berechnet. Die Volumenrestriktion kann aus denjenigen für Grundfläche und Höhe zusammen mit der Baumzahl/ha berechnet werden. Tabelle 3 gibt die Schätzwerte der Parameter an.

Tabelle 3

Schätzwerte der Parameter b_1, b_2 und b_3
Estimated values of the parameters b_1, b_2 , and b_3

Fläche	Houwhoek			Lottering		
	b_1	b_2	b_3	b_1	b_2	b_3
1	-2,837	14,532	0,442	4,486	-22,502	0,587
2	-2,627	8,877	0,399	1,230	- 8,560	0,498
3	-2,084	5,381	0,368	1,853	- 5,140	0,390
4	-1,911	4,024	0,351	-0,721	1,128	0,387
5	-1,350	2,222	0,314	-3,984	6,061	0,392
6	-0,495	1,018	0,265	-0,597	1,392	0,305
7	-1,542	1,494	0,291	-4,323	4,547	0,349
8	-0,967	0,103	0,258	-1,878	1,125	0,259

Zur Anwendung obengenannter Regressionsgleichungen, die ohne Ausnahme ein höheres Bestimmtheitsmaß aufwiesen, wurde der Erwartungswert der Grundfläche und der Mittelhöhe aus den diesbezüglichen Regressionsgleichungen abgeleitet. Die Regressionsgleichungen, eine für jede Fläche, wurden danach für die Berechnung des Bestandesvolumens verwendet. Das Ergebnis wird in Abbildung 6 aufgezeigt.

Der DGZ für Grundfläche und Volumen als eine Funktion des Alters für die Flächen 1 und 8 des Versuches Lottering ist in Abb. 7 aufgezeichnet.

Die Zuwachsreaktion durchforsteter Bestände

Die jeweils 10 Durchforstungsflächen der Versuche Houwhoek und Lottering dienten der Überprüfung einer Hypothese über den Erwartungswert des Grundflächenzuwachses. Die Hypothese lautete: Der Grundflächenzuwachs einer durchforsteten Fläche stimmt mit demjenigen einer undurchforsteten Fläche überein, wenn beide Flächen, unabhängig von der früheren Bestandesbehandlung, die gleiche Baumzahl je Hektar aufweisen. Das würde bedeuten, daß der Grundflächenzuwachs durchforsteter Bestände aus den Verbandsversuchen hergeleitet werden kann. Die undurchforsteten Verbandsflächen könnten in diesem Fall dazu verwendet werden, das Wachstum von Beständen mit unterschiedlicher Bestandesbehandlung zu simulieren.

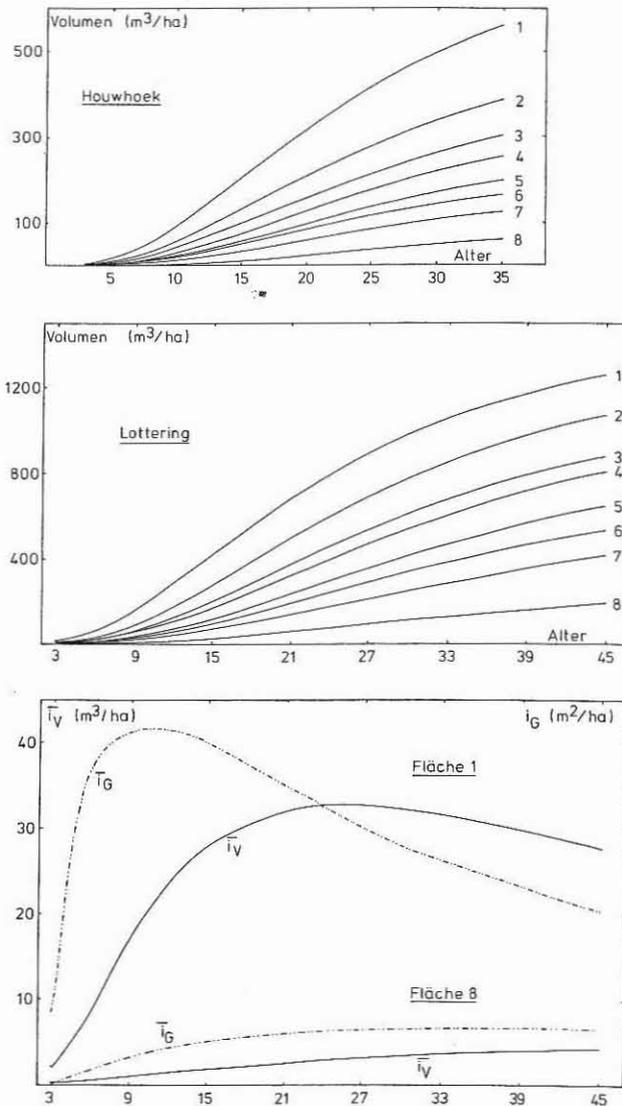


Abb. 6. Volumentwicklung
Fig. 6. Volume development

Abb. 7. DGZ für Grundfläche
und Volumen
Fig. 7. Mean annual increment
for basal area and volume

Zur Prüfung der genannten Hypothese kann die Abweichung des beobachteten Zuwachses von dem hypothetischen Wert als eine Zufallsvariable aufgefaßt werden. Für jede Durchforstungsparzelle wurden die beobachteten Grundflächenzuwachswerte vor und nach der ersten Durchforstung ins Verhältnis zum hypothetischen Zuwachs gesetzt. Das erstgenannte Verhältnis quantifiziert Bodenfruchtbarkeitsunterschiede innerhalb des Versuchsareals. Dieses Verhältnis wurde als konkomittante Variable in die Varianzanalyse eingeführt. Der Einfluß auf die Wirkungsvariable war jedoch nicht gesichert.

Diskussion

Die Pflanzverbandsversuche Houwhoek und Lottering wurden mit dem Ziel angelegt, die Bestandesentwicklung von *Pinus pinaster* unter dem Einfluß unterschiedlicher Ausgangsbaumzahlen zu erfassen. Im Gegensatz zu den älteren Pflanzverbandsversuchen in Zentral-Europa, z. B. dem Hauersteig-Versuch im Wienerwald, wurde eine größere Anzahl von Behandlungsvarianten in die Versuche aufgenommen. Dadurch konnten die Zusammenhänge zwischen den biometrischen Merkmalen der Bestandesentwicklung und der Ausgangsbaumzahl genauer erfaßt werden. In beiden Versuchen wurde jede Behandlungsvariante jedoch nur auf einer Fläche getestet. In der Regressionsanalyse mit den biometrischen Merkmalen als abhängigen Variablen wird auf Grund des Varianzquotienten $MQ\text{-}Xi/MQ\text{-}Fehler$ die Signifikanz der einzelnen Prädiktor-Variablen beurteilt. Die Summe der Abweichungsquadrate der Residualstreuung besteht aus zwei Komponenten. Sie enthält eine echte Zufallsstreuungskomponente und eine zweite, welche die ungenügende Anpassung der Ausgleichsfunktion erfaßt. Diese letztgenannte Komponente kann jedoch im Fall einer einzigen Wiederholung nicht auf ihre Signifikanz geprüft werden. Andererseits würde ein Versuch mit mehr als einer Wiederholung eine Zunahme der Residualstreuung und damit eine geringere Trennschärfe der Prüffunktion bewirken.

Es wäre durchaus denkbar, die beiden Versuche biometrisch als Wiederholungen aufzufassen. In diesem Fall wäre vorauszusetzen, daß keine Wechselwirkungen bestehen und die Blockwirkung additiv ist. Die Versuche wurden jedoch auf unterschiedlichen Standorten angelegt. Daher trifft die Annahme, daß zwischen Standort und Ausgangsbaumzahl keine Wechselwirkungen bestehen, im allgemeinen nicht zu. Die beiden Versuche wurden daher getrennt ausgewertet.

Die Schwerpunkte der Datenauswertung waren die Wahl der Wachstumsfunktion, der Ausgleich der einzelnen Gleichungen und die wachstumkundlichen Anomalien, die durch eine statistisch unabhängige Auswertung der Bestandesmerkmale Grundfläche/ha und Volumen/ha entstehen. Bei Anwendung der Chapman-Richards-Wachstumsfunktion wird angenommen, daß die Wachstumskurve einen Wendepunkt hat und das Bestandesmerkmal mit zunehmendem Alter sich einem zu schätzenden Grenzwert annähert. Die Annahme eines Wendepunktes trifft zu, aber in Plantagen mit schnellwachsenden südlichen Kiefernarten wird das Maximum des Durchmesser- und Höhenwachstums bereits vor dem Alter 3 erreicht. Die Annahme $m = 0$ ist daher vertretbar, wenn sich die Beobachtungsperiode vom Alter 3 bis zur Hiebsreife erstreckt. Für die Entwicklung von Durchmesser und Höhe kann allgemein die Annäherung an einen Grenzwert angenommen werden; für die Entwicklung der Grundfläche und ebenso des Volumens trifft diese Annahme nur mit Einschränkungen zu. Es wird häufig beobachtet, daß Grundfläche und Volumen/ha der Flächen mit der dichtesten Bestockung unter den Meßwerten der Flächen mit geringeren Baumzahlen/ha liegen. Dies dürfte allerdings nur in höherem Alter auftreten. Es trifft ab und zu auch auf die Flächen mit Baumzahlen von 1500 über dem Alter 30 zu. Dieses Phänomen ist die Folge der Abnahme der Grundfläche der lebenden Bäume in den dichtesten Beständen, nach Erreichen eines Maximums in relativ hohem Alter, als Folge der höheren Mortalität auf diesen Flächen. Für die am dichtesten bestockten Bestände trifft die Annahme eines Grenzwertes nicht zu. Auch in Versuchspartellen mit geringeren Ausgangsbaumzahlen könnte das der Fall sein. Je geringer die Ausgangsbaumzahl, desto höher ist das Alter, in dem das Maximum an lebender Grundfläche erreicht wird. Der Rückgang der Grundfläche nach Überschreiten des Maximums dürfte auf Streß zurückzuführen sein.

Es wäre denkbar, für einen ganzen Versuch das gesamte Datenmaterial eines bestimmten Bestandesmerkmals zusammenzufassen, aber dann würde die Annahme, daß die Residualabweichung in dem Regressionsmodell eine unabhängige Zufallsvariable darstellt, nicht zutreffen. Jedoch bewirkt die Randomisierung der Behandlungsvarianten innerhalb des Versuchsareals, daß die Parameterschätzwerte eine unabhängige, normalverteilte Zufallsvariable darstellen. Hinsichtlich der biometrischen Auswertung dieser Pflanzverbandsversuche bleibt die Modellforschung eine der wichtigsten Aufgaben.

Zusammenfassung

Die Bestandesentwicklung der Baumart *Pinus pinaster* unter dem Einfluß unterschiedlicher Ausgangsbaumzahlen wird anhand der Pflanzverbandsversuche Houwhoek und Lottering in Südafrika dargestellt. Für die Entwicklung des Mitteldurchmessers, der Mittelhöhe und der Grundfläche/ha wurde die Chapman-Richards-Funktion verwendet. Die Schätzwerte der diesbezüglichen Parameter wurden regressionsanalytisch über die Ausgangsbaumzahl/ha ausgeglichen.

Für den Ausgleich der Volumenwachstumskurven wurden die mit relativ hoher Genauigkeit erfaßten Grundflächenkurven als Grundlage gewählt. Es wurde versucht, die Wachstumskurven miteinander in Einklang zu bringen. Das Datenmaterial der einzelnen Flächen wurde zur Berechnung der Parameterwerte in Gleichungen mit Grundfläche/ha und Mittelhöhe und deren linearen Interaktion als erklärenden Variablen verwendet. Mit Hilfe dieser Parameterschätzwerte und den ausgeglichenen Grundflächen- und Höhenschätzwerten wurde das Volumenwachstum hergeleitet. Die Parameterwerte der unterschiedlichen Gleichungen können programmintern mit Hilfe von Subroutinen berechnet werden.

Für die Anlage von CCT-Versuchen wurden Stammzahlreduktionen vor dem Wirksamwerden von Wurzelkonkurrenz vorgeschrieben. Es wurde angenommen, daß die einzelnen Wachstumsabläufe sich ohne Anpassung für die Herleitung von Wachstumskurven eignen für Bestände, die erst nach dem Auftreten von Wurzelkonkurrenz durchforstet werden. Zwischen Blattoberfläche und damit Kronengröße und Zuwachs besteht ein kausaler Zusammenhang. Daraus könnte abgeleitet werden, daß der Erwartungswert des Zuwachses eines Bestandes mit einer bestimmten Baumzahl, der erst nach Auftreten von Wurzelkonkurrenz durchforstet wird, unter dem Erwartungswert eines Bestandes gleicher Baumzahl liegt, der vor Auftreten von Wurzelkonkurrenz durchforstet wurde. Die Ursache hierfür könnte die mangelhafte Kronenentwicklung des spätdurchforsteten Bestandes sein. In Wirklichkeit jedoch liegen die Zuwachswerte in den durchforsteten Flächen über denjenigen der Verbandsflächen. Der Grund hierfür könnte die Nichtbeachtung einer Vorschrift zur Durchführung des CCT-Versuches sein. Danach sollten Stammzahlreduktionen so ausgeführt werden, daß sich durch die notwendigen Baumentnahmen der Bestandesmitteldurchmesser nicht verändert. Diese Vorschrift wurde nicht immer befolgt, so daß die allmähliche Stammzahlreduktion auf Flächen mit geringen Anfangsbaumzahlen zu Beständen führte, in denen die durchschnittliche Zuwachspotenz der einzelnen Bäume über derjenigen liegt, die in früh durchforsteten Beständen erwachsen sind. Versuche, die Abweichungen der beobachteten von den hypothetischen Werten als abhängige Variable in einer multiplen Regressionsgleichung mit Behandlungsmerkmalen zu korrelieren, sind gescheitert. Die Ursache mag die geringe Trennschärfe der Prüffunktion sein. Dauerversuchsflächen könnten mehr Licht auf das Problem werfen. Das in diesen Versuchsflächen gewonnene Datenmaterial wird jedoch von Umweltfaktoren beeinflusst, im südlichen Afrika durch die Dürre der letzten Jahre, in Zentral-Europa durch die um sich greifende Walderkrankung.

Summary

Growth of Pinus pinaster (Aiton) as influenced by growing space

Spacing trials were established in *Pinus pinaster*, in plantations in the Southern and South-Western Cape Province in South Africa. Eight spacings, with nominal initial stem numbers between 125 and 3000 were tested in each of the two trials, with a single replicate in each experiment.

The Chapman-Richards growth model was applied to mean diameter, mean height and basal area/ha. For diameter and height, the assumption $m = 0$ holds true, but for basal area/ha, this parameter is related to initial stem number.

The volume growth of each sample plot was estimated from equations with basal area and mean height and their interaction as predictor-variables. The regression model also included constraints for basal area and height, to prevent anomalies for the estimated volume per hectare at young age.

Each of the trials contained a number of plots, thinned after the onset of competition. The growth rates in these plots was statistically significantly greater than that of the same stand density in the unthinned plots.

Literatur

- ASSMANN, E., 1960: Über die Brauchbarkeit des Verfahrens von Hart-Becking zum Festlegen der Durchforstungsstärke. Forstwiss. Cbl. 79, 65-72.
- VAN LAAR, A., 1978: The growth of unthinned *Pinus patula* in relation to spacing. S. A. Forestry Journal 107, 3-11.
- VAN LAAR, A., 1982: The response of *Pinus radiata* to initial spacing. S. A. Forestry Journal 121, 52-63.
- O'CONNOR, A. J., 1935: Forest research with special reference to planting distance and thinning. Br. Emp. For. Conf. 1935.
- OLIVEIRA, 1980: Untersuchungen zur Wuchsdynamik junger Kiefernbestände. Diss. München 1980.
- RAWAT, A. S.; FRANZ, F., 1974: Detailed nonlinear asymptotic regression studies on tree and stand growth with particular reference to forest yield research in Bavaria and India. In: Growth models for tree and stand simulation, Stockholm 1974, 180-221.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R., 1955: The water balance. Climatology, Vol. 2, No. 1.
- TURNBULL, K. S.; PIENAAR, L. V., 1973: The Chapman-Richards Generalization of von Bertalanffy's growth model in basal area growth and yield in even-aged stands. For. Sci. 21, 427-31.

Anschrift des Verfassers: Prof. Dr. Dr. A. VAN LAAR, Faculty of Forestry, University of Stellenbosch, Rep. of South Africa