

Analyse der Standraumökonomie von Einzelbäumen auf langfristig beobachteten Versuchsflächen – Methoden, Programmentwicklung und erste Ergebnisse –

Analysis of Single Tree Productivity and Growing Space on Long Term Trial Plots – Methods, Program Development and Initial Results –

H. UTSCHIG

Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, TU München

Zusammenfassung

Leisten großkronige Bäume mehr als kleinkronige? Wie hängt die Produktivität von Einzelbaum und Bestand zusammen? Diese Fragen werden vor allem bei sehr stark auf den Einzelbaum bezogenen Behandlungsprogrammen immer wichtiger. Die Beurteilung der Standraumökonomie auf Versuchsflächen bietet interessante Hinweise zur Klärung dieses Sachverhaltes. Voraussetzung ist, dass bereits vor längerer Zeit mindestens eine Kronenablotung und Stammfußmessungen durchgeführt wurden.

Die Methoden zur Berechnung des Standraumes von Einzelbäumen werden kurz vorgestellt und ihre Aussagekraft diskutiert. Für die Ermittlung der Standräume von Einzelbäumen wurde ein Verfahren verwendet, bei dem neben dem Abstand zwischen den benachbarten Bäumen die tatsächlichen Kronengrößen Grundlage für die Berechnung waren. Die Umsetzung der Standraumberechnung erfolgte über Voronoi-Diagramme. Bei diesem Verfahren werden zunächst aus den Kronenablotungen alle Flächen isoliert, die nur einfach überschirmt sind, sie dienen als polygonale Operatoren. Daran anschließend werden die verbleibenden Restflächen, Flächen die mehrfach überschirmt waren und Flächen ohne Überschirmung, hälftig den benachbarten Standflächen zugerechnet.

Der Zusammenhang zwischen Standraum des Einzelbaumes und seiner Zuwachsleistung und die standflächenbezogene Produktivität wird für 5 Versuche mit den Baumarten Eiche, Fichte und Buche untersucht. Es zeigt sich, dass mit zunehmender Standfläche zunächst der absolute Einzelbaumzuwachs deutlich ansteigt, um dann auf hohem Niveau zu verharren. Der Grenznutzen, den bereits relativ großkronige Bäume bei einer weiteren Zunahme der Kronengröße haben, ist gering. Die standflächenbezogene Produktivität nimmt bei Bäumen mit sehr großen Kronen in vielen Fällen wieder deutlich ab. Aus den Einzelbaumdaten können Rückschlüsse auf minimale und optimale Stammzahlhaltungen für Bestände gezogen werden.

Schlüsselwörter: Waldwachstum, Durchforstung, Standraumökonomie, Standraumanalyse, Einzelbaumreaktionen, Voronoi-Diagramm

Summary

Are trees with larger crowns more productive than those with smaller ones? How is the productivity of single trees related to stand productivity? These questions are of significance as forest management increasingly focuses on the single tree. In this paper, results from longterm trial plots are presented which provide interesting insights into the relationship between growth and growing space. Of particular importance for this investigation is the fact that crown radii measurements and stem position on the plots were carried out some time ago.

A new method is presented and discussed to assign a certain ground area to each tree. The method is based on Voronoi-diagrams and uses crown size and the distance between neighboring trees to determine the space occupied by a particular tree in the entire stand area. The method requires a two-step procedure. First, non-overlapping crown projection areas are isolated from the crown radii measurements. These areas serve as polygonal operators. Then, the rest of the crown projection area and the uncovered ground area are distributed evenly between the trees involved.

The relationship between the available ground area and tree growth are presented for 5 trial plots, including the species oak (*Quercus petraea*), spruce (*Picea abies*) and beech (*Fagus sylvatica*). It is apparent that single tree growth increases initially with decreasing stand density but approaches a saturation point after which the increasing growing space has no further effect on individual growth. Thus, tree

growth per related ground area decreases with increasing crown size, particularly if the crowns are already large. The results can be used to estimate the optimal stem number per hectare for maximum single tree growth or maximum stand productivity, respectively.

Keywords: forest growth, thinning, stand productivity, relationship between growth and growing space, single tree growth reactions, Voronoi-diagram

1 Einleitung

Dimensions- und Qualitätsmerkmale von Einzelbäumen und ihre Umgebungssituationen im Bestand liefern wichtige Hinweise zur Entscheidungsfindung bei einer selektiven Durchforstung. Der im Wald Tätige ist darauf angewiesen, dass er die visuell angesprochenen Merkmalswerte in ihrer Aussagekraft treffsicher beurteilt. Dabei spielt besonders die Ansprache der Krone eine wichtige Rolle. Deren Bedeutung für die Konkurrenzkraft und Zuwachsleistung in ihrer kurzfristigen und langfristigen Wirkung wird jedoch in Praxis und Wissenschaft recht unterschiedlich diskutiert (ASSMANN 1965, FLEDER 1987, FREIST 1962, KENNEL 1965, MAYER 1957, SPIECKER 1983, WILHELM et al. 1999).

Durchforstungskonzepte stellen grundsätzlich eine Abwägung dar zwischen flächenbezogenen Zielen (Zuwachsleistung, Massenertrag, Wertleistung, Bestandesschluß etc.) und dem Ziel einer optimalen Einzelbaumentwicklung (Dimension, Qualität, Vitalität, Krone). Je stärker waldbauliche Konzepte den Einzelbaum in den Mittelpunkt der Betrachtung stellen, um so mehr tritt die Frage in den Vordergrund: Was passiert, wenn ich aus dem Bestandesgefüge immer mehr Produzenten bzw. Stützstellen entnehme? Wird der frei werdende Bestandesraum effektiv genutzt? Wie groß ist der Vorteil, den die verbleibenden Bäume daraus ziehen? Auch diese Fragen werden in der Literatur (ASSMANN 1961, MAYER 1957, SCHÖBER 1988, SPIECKER 1991, UTSCHIG und PRETZSCH 2001) recht unterschiedlich beantwortet.

Ein Ansatz zur grundsätzlichen Analyse des Fragenkomplexes Wuchsraum, Zuwachs und Entwicklung der Produktivität ist die Auswertung von Einzelbaum-Entwicklungsdaten auf langfristigen Versuchsflächen. Von solchen Anlagen, bei denen die Stammfußpositionen seit längerem vorliegen und die Kronendimensionen der Einzelbäume vermessen wurden, kann die langfristige Auswirkung forstlicher Maßnahmen auf Einzelbaum- und Bestandesebene sehr gut nachvollzogen werden.

2 Untersuchungsmaterial

Aus dem reichhaltigen Datenmaterial des Bayerischen Ertragskundlichen Versuchswesens wurden solche Flächen für Reinbestände der Baumarten Eiche, Fichte und Buche ausgewählt,

- die bereits sehr lange beobachtet werden,
- die Parzellen mit sehr unterschiedlichen Eingriffsstärken aufweisen,
- die Parzellen mit einer ausreichende Flächengröße haben, um mindestens 15 Bäume für jede Behandlungsvariante untersuchen zu können und
- für die Stammfußkoordinaten und mindestens eine Kronenablotung vorliegen.

Einige wichtige ertragskundliche Kenndaten für die verwendeten Flächen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Zunächst werden die einzelnen Versuche kurz charakterisiert:

Für die Baumart Eiche wird der Versuch **Waldleiningen 88** (UTSCHIG und PRETZSCH, 2001) aus dem Pfälzer Wald herangezogen, der seit 1934 unter Beobachtung steht. Er ist jetzt 113 Jahre alt. In Abhängigkeit von der Grundfläche auf der unbehandelten Vergleichs-parzelle wurden die Grundflächen der behandelten Parzellen um 30 % (mäßige Hochdurchforstung) und um 50 % (starke Hochdurchforstung) abgesenkt. Der Durchmesser des Grundflächenmittelstammes der 100 stärksten Stämme (do) ist bei der starken Hochdurchforstung jetzt um 3 cm höher als bei der mäßigen Hochdurchforstung.

Table 1. Charakterisierung der Untersuchungsbestände: Angegeben sind Baumart, Versuch (Waldleiningen 88 (Wal 88), Weißenburg 613 (Wbu 613), Denklingen 05 (Den 05), Fabrikschleichach 15 (Fab 015), Starnberg 91 (Sta 91)), Parzelle (Pz.Nr.), Behandlungsprogramm (Beh.), das Jahr der ersten und letzten Aufnahme, das Alter zum Zeitpunkt der letzten Aufnahme, die Stammzahl/ha (N/ha), die Oberhöhe (Mittelhöhe der 100 stärksten Stämme/ha) (ho) und deren Mitteldurchmesser (do), die Bestandesgrundfläche (G), der Vorrat (V), der laufende jährliche Volumenzuwachs (iv) in der letzten Zuwachsperiode und die Zeitpunkte, für die eine Kronenablotung (Jahr_1 bis Jahr_3) vorliegt.

Table 1.: Characteristic of the long-term trial plots: Tree species (Baumart), trial plot (Versuch) Waldleiningen 88 (Wal 88), Weißenburg 613 (Wbu 613), Denklingen 05 (Den 05), Fabrikschleichach 15 (Fab 015), Starnberg 91 (Sta 91)), plot number (Pz.Nr.), thinning programme (Beh.), the year of the first and last survey (Jahr), stand age at the last survey (Alter), stem number per hectare (N/ha), top height (ho) (mean height of the 100 trees with the largest diameter per hectare) and their mean diameter (do), basal area (G), growing stock (V), annual increment (iv) during the last survey period and the date were surveys of the crowns (Kronenablotung) are available (Jahr_1 up to Jahr_3).

Baumart	Versuch	Pz.Nr.	Beh.	erste/letzte		Aufnahme						Kronenablotungen				
				Jahr	Jahr	Alter	N/ha	ho	do	G	V	iv	Jahr 1	Jahr 2	Jahr 3	
				Jahr	Jahr	Jahre	Stück	[m]	[cm]	[qm]	[VfmD]	[VfmD]				
Eiche	Wal 88	5	schw. Ndf	1934	1999	113	457	33.7	43.4	19.9	655	11.7	1952	1978	1994	
			mä. Hdf	1934	1999	113	200	32.5	42.4	23.7	401	11.2	1952	1978	1994	
			st. Hdf	1934	1999	113	138	32.9	45.4	39.5	346	8.5	1952	1978	1994	
Fichte	Wbu 613	2	A-Grad	1974	1996	74	987	31.5	41.9	64	855	23.2	1975	1987	1996	
			schw. Adf	1974	1996	74	582	32.4	46.5	47	624	19.3	1975	1987	1996	
			st. Adf	1974	1996	74	411	32.3	45.4	38	501	19.8	1975	1987	1996	
	Den 05	1	A-Grad	1882	1990	143	508	42.6	63.7	89	1623	18.2	1979			
			mä. Ndf	1882	1990	143	388	42.8	65.2	89	1597	17.0	1979			
			st. Ndf	1882	1990	143	276	42.8	68.6	74	1325	16.6	1979			
Buche	Fab 15	1	A-Grad	1870	2000	178	388	35.2	52.3	55.2	955	6.2	1981	2000		
			schw. Ndf	1870	2000	178	218	39.7	59.3	45.5	924	11.4	1981	2000		
			st. Ndf	1870	2000	178	189	39.9	63.0	41.2	854	10.4	1981	2000		
			st. Hdf	1980	2000	178	108	35.8	62.6	32.4	614	8.7	1981	2000		
	Sta 91	2	1	A-Grad	1951	1998	71	788	29.2	33.9	38	527	17.1	1994		
				mä. Hdf	1951	1998	71	424	27.0	35.7	26	346	19.3	1994		
				st. Hdf	1951	1998	71	245	27.5	36.4	19.8	273	12.6	1994		

Der Versuch **Weißenburg 613** liegt auf der Hochfläche der Fränkischen Alb. Er repräsentiert einen spät durchforsteten Fichtenbestand (PREUHLER und SCHMIDT 1989), der ab einem Alter von 52 Jahren über einen Zeitraum von jetzt 22 Jahren unterschiedlich stark durchforstet wurde. Die maximale Grundflächenabsenkung beträgt hier 40 %. Der laufende Volumenzuwachs der behandelten Parzellen liegt bei 19–20 VfmS/ha und Jahr und damit etwa 15 % unter dem Zuwachsniveau des A-Grades.

Hinsichtlich Beobachtungszeit und Andauer der Durchforstung stellt der Fichten-Durchforstungsversuch **Denklingen 05** aus dem Forstamt Schongau eine Besonderheit dar (ASSMANN 1961, RÖHLE 1995). Dieser Versuch wurde 1882 angelegt und über einen Zeitraum von 108 Jahren beobachtet. Als Behandlungskonzept kam eine klassische Staffellung von A-, B- und C-Grad-Durchforstung nach den Grundsätzen des Vereins Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten (1902) zur Anwendung. Der Durchmesservorsprung (do) des C-Grades beträgt im Alter von 143 Jahren fast 5 cm.

Bei der Baumart Buche konnte ebenfalls ein sehr langfristiger Durchforstungsversuch, **Fabrikschleichach 015** aus dem Steigerwald, in die Untersuchung einbezogen werden. Dieser Versuch repräsentiert eine der wenigen noch intakten Versuchsanlagen aus der Gründungszeit des ertragskundlichen Versuchswesens um 1870, der ebenfalls die klassische Behandlungsstaffellung in A-, B- und C-Grad aufweist (PRETZSCH 2002). Darüber hinaus wurde in diesen Versuch seit 1980 eine Lichtwuchsparzelle (Parzelle 4) mit einbezogen, die schon früher von FREIST (1962) bereits einmal aufgenommen wurde. Aktuell ist die Grundfläche der Lichtungsfläche um 41 % geringer als auf der A-Grad Fläche. Der

do steigt mit zunehmender Eingriffsstärke an, die maximale Differenz zum A-Grad beträgt auf der Lichtungsparzelle über 14 cm.

Zur Abrundung des Datenmaterials wurde ein jüngerer Buchen-Durchforstungsversuch aus Südbayern, der Versuch **Starnberg 91** (UTSCHIG 2000), einbezogen. Der jetzt 71jährige Versuch steht seit 1954 unter Beobachtung und hat wie der Versuch Waldleiningen 88 ein grundflächengesteuertes Behandlungskonzept. Der A-Grad definiert die maximale Dichte, die mäßige Hochdurchforstung ist als Grundflächen-Absenkung um 20 % und die starke Hochdurchforstung als Absenkung um 50 % definiert. Trotz der bereits frühzeitig beginnenden Durchforstung (ab Alter 38) beträgt hier der Durchmesser Vorsprung (do) der starken Hochdurchforstung nur 2,5 cm.

3 Methoden zur Analyse des Standraumes und zur Beurteilung der Standraumökonomie

3.1 Methoden zur Herleitung der Standfläche

Bäume sind durch ihre Merkmalsausprägungen Brusthöhendurchmesser in 1,3 m Höhe (BHD), Höhe, Krone (Länge, Breite, Form) und räumliche Anordnung im Bestand (x, y, z-Koordinaten) in ihrer Raumbesetzung beschreibbar. Bei der Betrachtung der Standfläche wird ausschließlich die horizontale Anordnung der Bäume betrachtet. Je nach Verfahren gehen nur die Abstände bzw. die Kronenprojektionen der Bäume in die Berechnung ein oder es werden mit Merkmalswerten (z. B. BHD) gewichtete Standräume berechnet (STERBA, 2002). Forstwissenschaftliche Untersuchungen zum Standraum der Bäume und seiner Berechnung wurden mit den schnell wachsenden Möglichkeiten ihrer EDV-technischen Umsetzung seit den 60er Jahren vermehrt durchgeführt (BROWN 1965, PRODAN 1968, SCHULZ 1968, WENK et al. 1990).

Die Kronenprojektionsfläche eines Baumes ist ein Maß für seine Produktionskraft. Sie beschreibt die Kronenquerschnittsfläche in der Höhe ihrer maximalen Kronenausdehnung (= Kronenschirmfläche bzw. Kronengrundfläche). Zur Berechnung der Kronengrundflächen im Rahmen der Standraumanalyse wurden die Kronenradien über Splines ausgeglichen (s. unten). Die Auswertung von Kronenablotungen ermöglichen beim Einbezug der Baumkoordinaten direkte Aussagen über die Raumausnutzung in Beständen (PRETZSCH 2002). Fehlen Kronenablotungen kann die Standfläche eines Baumes aus den Stammabständen zu den Nachbarbäumen hergeleitet werden. Sie beschreibt dann die potentielle Standfläche eines Baumes, aber nicht, wie diese ausgefüllt ist. Die Standflächenberechnung nach ASSMANN (1961) verbindet durch den Einbezug der Krone beide Verfahren, die Standraumökonomie der Bäume kann auf der Basis der Kronenausdehnung analysiert werden. Ein Nachteil ist jedoch immer noch die zweidimensionale Betrachtungsweise.

Die Standflächenberechnung nach ASSMANN (1961) wurde als Modul des Versuchsflächen-Auswertungssystems des Lehrstuhls für Waldwachstumskunde in der Programmiersprache C++ realisiert. Als Lösungsansatz wurden Voronoi-Diagramme verwendet. Sie stammen aus der Astronomie (erste Ansätze von DESCARTES 1644) und Kristallographie. Ziel des Algorithmus ist es, effizient Raumbesetzungsmuster zu identifizieren. Von SEIFERT und UTSCHIG (2002) wurde ein Verfahren entwickelt, das sowohl die Kronenschirmfläche als auch den Freiraum zwischen den Kronen den Bäumen eindeutig zuordnet. Das Voronoi-Diagramm teilt einen Raum bzw. hier eine Fläche in Zellen, die sogenannten Voronoi- oder Dirichletzellen auf (AURENHAMMER 1991, OKABE et al. 2000). Das Verfahren interpoliert zunächst die Kronenablotungen mit Hilfe eines parametrischen zyklischen Splines (SPÄTH 1978). Diese Splinekurve wird anschließend durch einen Polygonzug mit 100 Stützpunkten approximiert und die resultierenden Kronenpolygone miteinander verschnitten. Die nun selektierten Kronenteilflächen mit Einfachüberschirmung (Abb. 1, links) dienen im nächsten Schritt als Generatoren für das Voronoi-Diagramm.

Dabei wird der Raum vollständig in disjunkte Teilbereiche unterteilt. Als Ergebnis wird jedem Baum eine bestimmte Fläche zugewiesen, die die gesamte Einfachüberschirmung seiner Krone enthält und zusätzlich anteilmäßig die ihn umgebenden Mehrfachüberschirmungen und Freiflächen zuteilt. Aufgrund der Eigenschaften des Voronoi-Diagramms wird dabei die gesamte Bestandesfläche gänzlich, ohne Überlappungen aufgeteilt (Abb. 1, rechts).

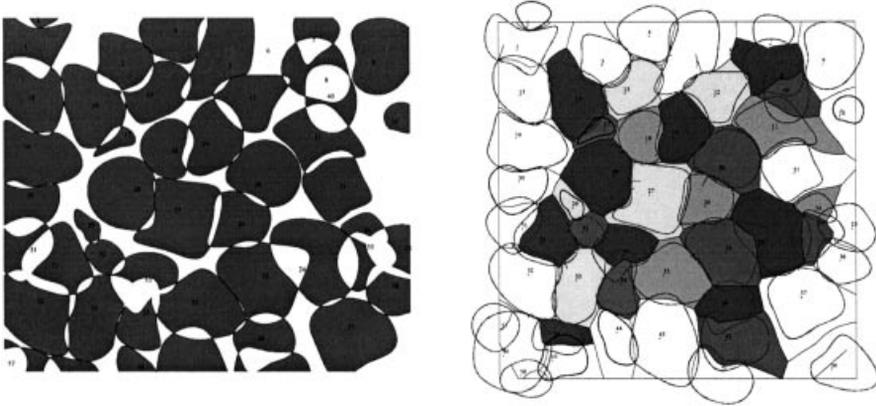


Abb. 1: Ausschnitt aus der Standflächenkarte der Versuchsfläche Fabrikschleichach 15, Parzelle 4. Ein-gezeichnet sind die Kronenschirmflächen der Einzelbäume mit Einfachüberschirmung (links). Sie dienen als Generatoren für die Voronoi-Diagramme. Die verbleibenden Restflächen werden über die Abstände zwischen den Generatoren gänzlich aufgeteilt (rechts). Die so ermittelten Voronoi-Zellen repräsentieren die Standflächen der Bäume.

Fig. 1: Map detail of the long-term trial Fabrikschleichach 15, plot 4. The left figure shows the single crown projection of each tree. They are used as generators for Voronoi-diagrams. The remaining area will be partitioned between the generators (right figure). The so generated Voronoi-cells represent the calculated ground area for each stem.

3.2 Methoden zur Beurteilung der Standraumökonomie

Die Berechnung der Standfläche zeigt die Expansion der Kronen in Abhängigkeit von der Bestandesdichte und der Baumdimension. Wie effizient der Baum mit seiner Standfläche umgeht, erschließt sich, wenn die genutzte Standfläche mit dem produzierten Zuwachs in einer Zuwachsperiode verglichen wird. Um Probleme bei der Berechnung von Standräumen direkt im Anschluß an starke Durchforstungen auszuschließen (WILHELM 2002) wurden nur Aufnahmezeitpunkte ausgewählt, die keine starken Änderungen in der Relation Standraum/Kronenschirmfläche aufwiesen, die Durchforstungen liegen mindestens 5 bis 10 Jahre zurück. Die Endergebnisse der verschiedenen Durchforstungen, nämlich deutlich unterschiedliche Standräume und Kronengrößen, wurden einer eingehenden Analyse in ihrer Wirkung auf den Zuwachs unterzogen.

Zur Verknüpfung mit den Zuwachsdaten wurden folgende Berechnungen durchgeführt:

Zunächst erfolgt die einzelbaumweise Voluminierung für verschiedene Aufnahmezeitpunkte aus BHD, Höhe (aus der Bestandeshöhenkurve) und den Derbholzformzahlen für Laubholz und den Schaftholzformzahlen für Nadelholz (KENNEL 1969). Anschließend wird aus den Einzelbaumvolumina zu Beginn und am Ende der Beobachtungsperiode der mittlere periodischen Einzelbaumzuwachs berechnet. Abschließend konnten durch den Bezug des Zuwachses auf die Kronengrundfläche bzw. die Standfläche des Einzelbaumes normierte Leistungsgrößen berechnet werden.

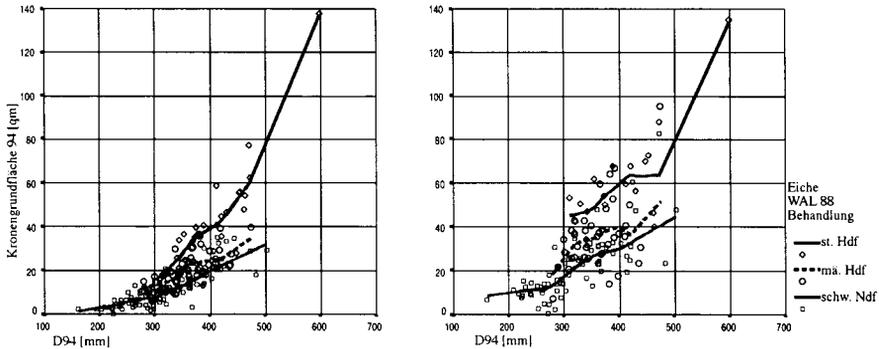


Abb. 2: Kronenschirmfläche (links) und Standfläche (rechts) in Abhängigkeit vom BHD (D94 = Durchmesser zum Aufnahmezeitpunkt 1994) und der Eingriffsstärke auf der Versuchsfläche Waldleiningen 88. Die Punktwolken der einzelnen Behandlungsvarianten (st. Hdf = starke Hochdurchforstung, mä. Hdf = mäßige Hochdurchforstung, schw. Ndf = schwache Niederdurchforstung) sind mittels partieller Regression ausgeglichen.

Fig. 2: Crown projection area (left) and growing space (ground area assigned to each stem, right) in dependence on diameter at breast height (D94 = diameter as measured in 1994) and thinning intensity at the long-term trial Waldleiningen 88. Partial regression is used to differentiate between the different thinning intensities ('st. Hdf' = heavy thinning from above, 'mä. Hdf' = moderate thinning from above, 'schw. Ndf' = weak thinning from below).

4 Ergebnisse

4.1 Wirkung der Durchforstung auf die Kronendimension und die Standfläche

Zunächst zeigt sich erwartungsgemäß, dass mit steigendem BHD die Kronengrößen der Bäume deutlich zunehmen (Abb. 2). Darüber hinaus bilden Bäume mit zunehmender Durchforstungsstärke bei gleichem BHD größere Kronen aus. Betrachtet man die Standflächen dieser Bäume, so zeigt sich noch klarer der Einfluss der Durchforstung. Je stärker die Durchforstung um so größer wird die zur Verfügung stehende Standfläche pro Baum. Bei gleichem BHD steht den Bäumen bei der starken Durchforstung oftmals ein doppelt so großer Straundraum zur Verfügung wie beim A-Grad.

Die Gesamtschau der Kronengrößen und der Standflächenverteilung für alle untersuchten Versuchspartellen ist Abbildung 3 zu entnehmen. Auf allen Flächen steigt mit zunehmender Eingriffsstärke die Kronengrundfläche deutlich an. Besonders ausgeprägt ist dies auf der Buchen-Versuchsfläche Fabrikschleichach 015. Das stark gestaffelte Behandlungskonzept führt zu einer sehr unterschiedlichen Ausprägung in der Verteilung der Kronengrundflächen auf den Parzellen. Nur der Fichtenversuch Weißenburg 613 zeigt bisher keine erkennbare Reaktion in der Verteilung der Kronengrundflächen auf die Eingriffe obwohl die Durchforstung vor mehr als 23 Jahren begonnen wurde.

Betrachtet man die Verteilung der Standflächen auf den Parzellen, so ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den Kronengrundflächen. Der Wertebereich wird insgesamt größer. Auch für den Versuch Weißenburg 613 wird jetzt eine Staffelung des zur Verfügung stehenden Straundraumes entsprechend der Eingriffsstärke deutlich. Dies bedeutet, dass in diesem Versuch gleich große Kronen mit zunehmender Eingriffsstärke mehr freien Platz um sich haben.

4.2 Einzelbaumzuwachs und standflächenbezogener Zuwachs auf den Versuchsflächen in Abhängigkeit von der Standfläche

Im folgenden werden die Zuwachsleistungen von Bäumen bei unterschiedlichen Standflächen und die dazugehörigen standflächenbezogenen Zuwachsleistungen unter-

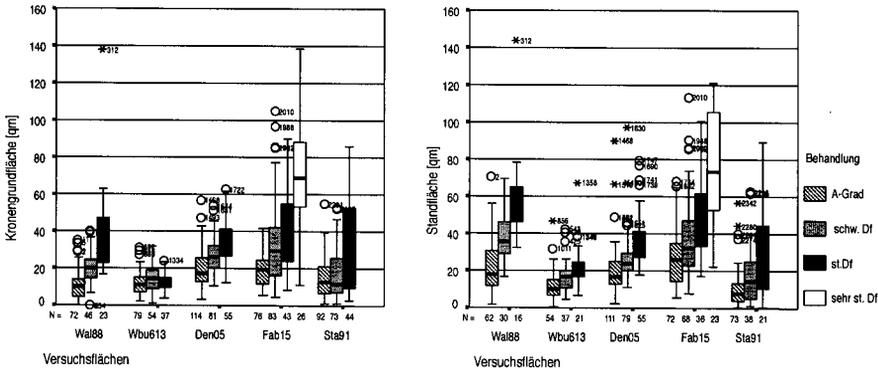


Abb. 3: Kronenschirmfläche (links) und Standfläche (rechts) in Abhängigkeit von der Bestandesbehandlung (A-Grad, schw. Df = schwache, st. Df = starke und sehr st. Df = sehr starke Durchforstung, für die einzelnen Versuche (Waldleiningen 88 (Wal 88), Weißenburg 613 (Wbu 613), Denklingen 05 (Den 05), Fabrikschleichach 15 (Fab 15), Starnberg 91 (Sta 91)). Die Durchforstungs Eingriffe werden hier nur nach der Durchforstungsstärke sortiert, die Durchforstungsart (Hoch- oder Niederdurchforstung) wird nicht unterschieden. Die Darstellung der Verteilung erfolgt als Box-plot, innerhalb der Box sind 50 % der Messwerte, der schwarze Balken in der Box gibt den Median an, die Spannweite des Plots beschreibt den Bereich, in dem 95 % der Messwerte liegen, Ausreißer werden mit Kreisen gekennzeichnet, Sterne markieren Extremwerte die außerhalb der dreifachen Standardabweichung liegen, die Zahlen weisen auf den betreffenden Datensatz hin.

Fig. 3: Crown projection area (left) and growing space (ground area assigned to each stem, right) in dependence on thinning intensity ('A-Grad' = weak thinning, 'schw. Df' = moderate thinning, 'st. Df' = heavy thinning, 'sehr st. Df' = no canopy closure) for each of the long-term trials Waldleiningen 88 (Wal 88), Weißenburg 613 (Wbu 613), Denklingen 05 (Den 05), Fabrikschleichach 15 (Fab 15), and Starnberg 91 (Sta 91). Thinnings are differentiated only by intensity (loss of basal area) and not by thinning procedure (from below or above). Within the range of the presented box-plots are 50 %, and within the indicated boundaries are 95 % of all measuring values; the black line indicates the position of the median. Outliers are denoted as circles, extreme values that are beyond the threefold standard deviation are presented as stars, and numbers indicate the number of the tree used for these calculations.

sucht. Die Zuwachsleistungen der Einzelbäume (y-Achse des linken Teils der folgenden Abbildungen 4–8) müssen nur mit der dazugehörigen Stammzahl multipliziert werden, um auf den hektarbezogenen Zuwachs zu kommen. Die standflächenbezogenen Zuwachsleistungen (y-Achse des rechten Teils der folgenden Abbildungen 4–8) müssen mit 10.000 multipliziert werden, um auf die Zuwachsleistung pro Hektar zu erhalten. In den Darstellungen werden die Bäume in Standflächenklassen mit einer Breite von 20 Quadratmetern eingeordnet. Die jeweils höchste Standflächenklasse einer Versuchsfläche umfasst alle Bäume, die größer sind als die vorhergehende obere Klassengrenze.

Als erstes wird der Versuch Waldleiningen 88, ein im Jahre 1999 113-jähriger Eichen-Durchforstungsversuch, betrachtet (Abb. 4), die letzte stärkere Durchforstung war im Jahr 1983. Hier ist zunächst ein stetiger Anstieg der Zuwachsleistung pro Einzelbaum mit Zunahme der Standfläche zu erkennen. In der Standflächenklasse 4 (60 bis 80 qm Standfläche) findet jedoch kein weiterer Anstieg des Volumenzuwachses im Vergleich zu den produktiven Bäumen der Standflächenklasse 3 statt. Nur der einzige Baum in der Standflächenklasse 5 (> 80 qm) macht hier eine Ausnahme. Bei der Betrachtung der Zuwachsleistung pro Quadratmeter Standfläche wandelt sich das Bild. Zunächst fällt auf, dass Bäume mit kleiner Standfläche eine ebenso große Zuwachsleistung erbringen können wie Bäume mit wesentlich größeren Standflächen. Mit zunehmender Größe der Standfläche sinkt die Spannweite der Box-Plots. Der größte Baum auf der Fläche nimmt die Standflächenklasse 5 (> 80 qm) ein und hat absolut den höchsten Volumenzuwachs von über 0,12 VfmD/Jahr.

Betrachtet man die standflächenbezogene Leistung dieses Baumes, so liegt sie mit 0,009 VfmD/qm nur im Mittelfeld des möglichen Leistungsspektrums der Eichen auf diesen Versuchsparzellen. Würden auf einer Fläche im Alter von 113 Jahren nur solche Bäume stehen, würde der jährliche Volumenzuwachs 9 VfmD/ha und Jahr betragen.

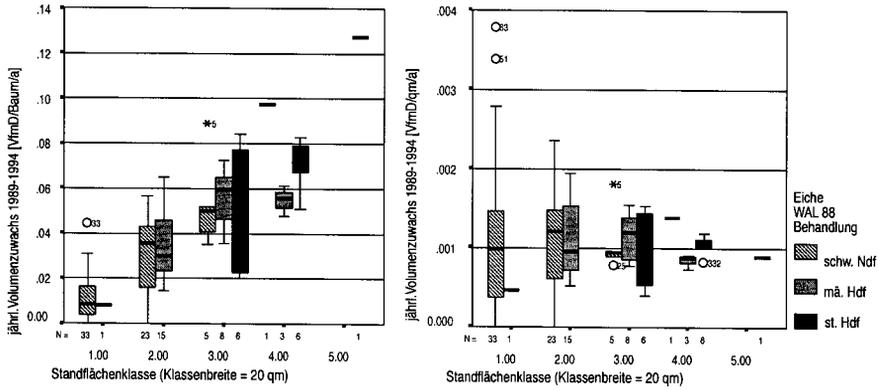


Abb. 4: Versuchsfläche Waldleiningen 88, dargestellt ist der laufende Volumenzuwachs pro Einzelbaum in Abhängigkeit von der Standfläche (links) und der laufende Volumenzuwachs pro Quadratmeter Standfläche (rechts) in Abhängigkeit von der Bestandesbehandlung als Box-Plot. (Für weitere Erläuterungen siehe Abbildung 3.) Die Standfläche der Einzelbäume wurde in Klassen mit einer Breite von jeweils 20 m² eingeteilt (1 = 0–19,9 m², 2 = 20–39,9 m², 3 = 40–59,9 m², 4 = 0–79 m², 5 = ≥ 80 m²).

Fig. 4: Long-term trial Waldleiningen 88: Current annual volume increment of trees within different growing space classes (left) and current annual volume increment per m² ground area (right) in dependence on thinning intensity. (See Figure 3 for further explanations.) The growing space classes are distinguished as follows: 1 = 0–19.9 m², 2 = 20–39.9 m², 3 = 40–59.9 m², 4 = 0–79 m², 5 = ≥ 80 m².

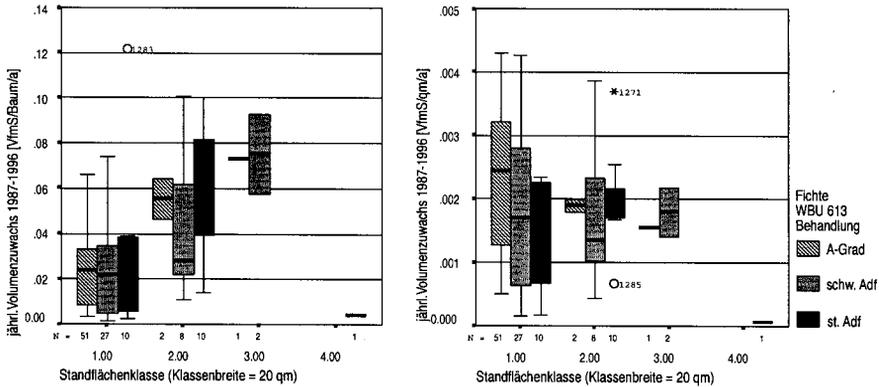


Abb. 5: Versuchsfläche Weißenburg 613, dargestellt ist der laufende Volumenzuwachs pro Einzelbaum in Abhängigkeit von der Standfläche (links) und der laufende Volumenzuwachs pro Quadratmeter Standfläche (rechts) in Abhängigkeit von der Bestandesbehandlung als Box-Plot. (Für weitere Erläuterungen siehe Abbildung 3.) Die Standfläche der Einzelbäume wurde in Klassen mit einer Breite von jeweils 20 qm eingeteilt (1 = 0–19,9 m², 2 = 20–39,9 m², 3 = 40–59,9 m², 4 = ≥ 60 m²).

Fig. 5: Long-term trial Weißenburg 613: Current annual volume increment of trees within different growing space classes (left) and current annual volume increment per m² ground area (right) in dependence on thinning intensity. (See Figure 3 for further explanations.) The growing space classes are distinguished as follows: 1 = 0–19.9 m², 2 = 20–39.9 m², 3 = 40–59.9 m², 4 = ≥ 60 m².

Für den Fichten-Durchforstungsversuch Weißenburg 613 (Abb. 5) ergibt sich im Alter von 74 Jahren ein ähnliches Bild wie für die Versuchsfläche Waldleiningen 88. Mit zunehmendem Standraum steigen die Einzelbaumzuwächse deutlich an. Innerhalb der gleichen Standflächenklasse steigen die Einzelbaumzuwächse mit zunehmender Durchforstungsstärke. Betrachtet man die standflächenbezogene Zuwachsleistung, so kehrt sich das Bild um. Bäume der niedrigsten Standflächenklasse haben die höchsten Zuwächse, innerhalb der Klassen sinkt mit zunehmender Eingriffsstärke die Zuwachsleistung pro Quadratmeter Standfläche ab. Die Versuchsfläche Weißenburg 613, Parzelle 3, weist eine Parzellengröße von nur 30×30 m auf. Bei der Behandlungsvariante „starke Auslesedurchforstung“ mussten durch die geringe Versuchsflächengröße wegen Randeffekten viele Bäume von der Untersuchung ausgeschlossen werden. Die Anzahl der Probebäume ist bei dieser Variante deutlich reduziert. Daher können verlässliche Aussagen nur für die ersten beiden Standflächenklassen gemacht werden, es ist aber interessant wie sich selbst die wenigen Bäume der höheren Klassen in das Gesamtbild einfügen.

Abbildung 6 zeigt die Entwicklung für den Fichten-Durchforstungsversuch Denklingen 05, die letzten Durchforstungseingriffe liegen schon 23 Jahre zurück. Als Folge der Eingriffe treten Standflächen über $60 \text{ qm}/\text{Einzelbaum}$ auf. Mit zunehmender Eingriffsstärke finden sich mehr Bäume in größeren Standflächenklassen. Die Zuwachsleistung pro Einzelbaum steigt mit zunehmender Standfläche deutlich an. Spitzenwerte liegen zwischen $0,10$ bis $0,12 \text{ VfmS}/\text{ha}$ und Jahr. Im A-Grad leisten Bäume mit Standflächen zwischen 40 und 60 Quadratmetern einen ebenso hohen einzelbaumbezogenen Zuwachs wie Bäume in der nächst höheren Standflächenklasse. Bezogen auf den Quadratmeter Standfläche ergibt sich mit zunehmender Standfläche ein Rückgang in der Standflächenproduktivität. Es deutet sich eine Optimumsbeziehung an.

Ein sehr differenziertes Bild zeigt der Buchen-Durchforstungsversuch Fabrikschleichach 015 (Abb. 7). Das Durchforstungsprogramm weist eine sehr breite Staffe lung in der Behandlung auf, die letzte Durchforstung liegt 32 Jahre zurück. Im A-Grad betragen die maximalen Standflächen 60 bis 80 Quadratmeter/Baum während sie auf den anderen

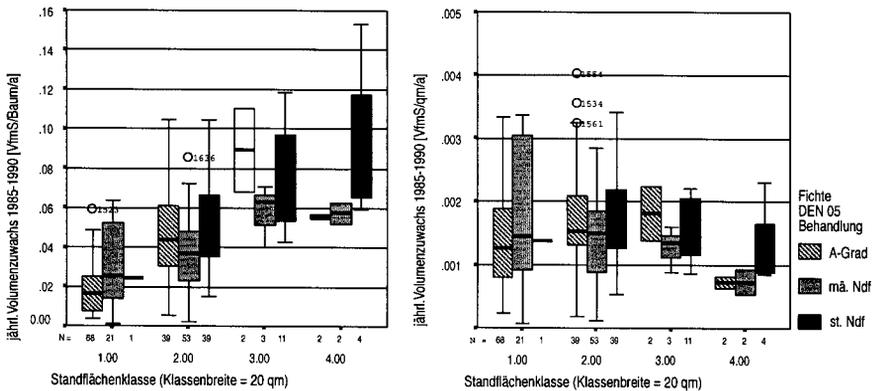


Abb. 6: Versuchsfläche Denklingen 05, dargestellt ist der laufende Volumenzuwachs pro Einzelbaum in Abhängigkeit von der Standfläche (links) und der laufende Volumenzuwachs pro Quadratmeter Standfläche (rechts) in Abhängigkeit von der Bestandesbehandlung als Box-Plot. (Für weitere Erläuterungen siehe Abbildung 3.) Die Standfläche der Einzelbäume wurde in Klassen mit einer Breite von jeweils 20 qm eingeteilt. (1 = $0-19,9 \text{ m}^2$, 2 = $20-39,9 \text{ m}^2$, 3 = $40-59,9 \text{ m}^2$, 4 = $\geq 60 \text{ m}^2$).

Fig. 6: Long-term trial Denklingen 05: Current annual volume increment of trees within different growing space classes (left) and current annual volume increment per m^2 ground area (right) in dependence on thinning intensity. (See Figure 3 for further explanations.) The growing space classes are distinguished as follows: 1 = $0-19,9 \text{ m}^2$, 2 = $20-39,9 \text{ m}^2$, 3 = $40-59,9 \text{ m}^2$, 4 = $\geq 60 \text{ m}^2$.

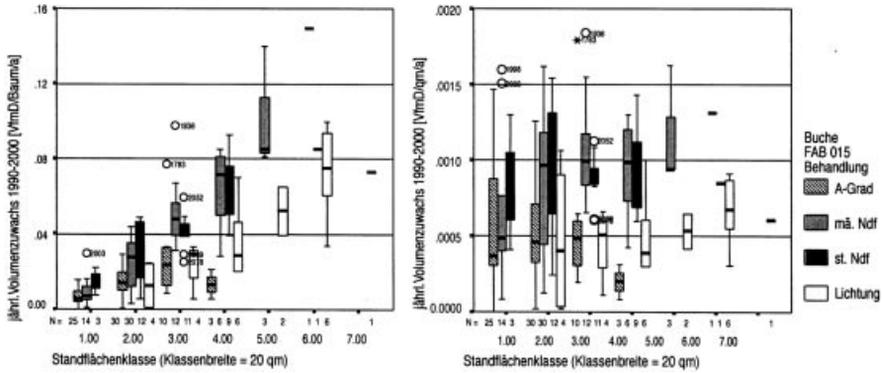


Abb. 7: Versuchsfläche Fabriksschleichach 015, dargestellt ist der laufende Volumenzuwachs pro Einzelbaum in Abhängigkeit von der Standfläche (links) und der laufende Volumenzuwachs pro Quadratmeter Standfläche (rechts) in Abhängigkeit von der Bestandesbehandlung als Box-Plot. (Für weitere Erläuterungen siehe Abbildung 3.) Die Standfläche der Einzelbäume wurde in Klassen mit einer Breite von jeweils 20 m² eingeteilt (1 = 0–19,9 m², 2 = 20–39,9 m², 3 = 40–59,9 m², 4 = 60–79 m², 5 = 80–99,9 m², 6 = 100–119,9 m², 7 = ≥ 120 m²).

Fig. 7: Long-term trial Fabriksschleichach 015: Current annual volume increment of trees within different growing space classes (left) and current annual volume increment per m² ground area (right) in dependence on thinning intensity. (See Figure 3 for further explanations.) The growing space classes are distinguished as follows: 1 = 0–19.9 m², 2 = 20–39.9 m², 3 = 40–59.9 m², 4 = 60–79 m², 5 = 80–99.9 m², 6 = 100–119.9 m², 7 = ≥ 120 m².

Parzellen bis über 120 Quadratmeter anwachsen können. Die großkronigen Bäume im A-Grad haben bereits wieder geringere absolute Einzelbaumzuwächse als Bäume mit mittleren Kronen. In der mäßigen und starken Niederdurchforstung steigen die Einzelbaumzuwächse mit zunehmender Standfläche deutlich an. Die Lichtungsfläche zeigt ein ähnliches Bild, liegt jedoch im absoluten Niveau unter der mäßigen und starken Nieder-

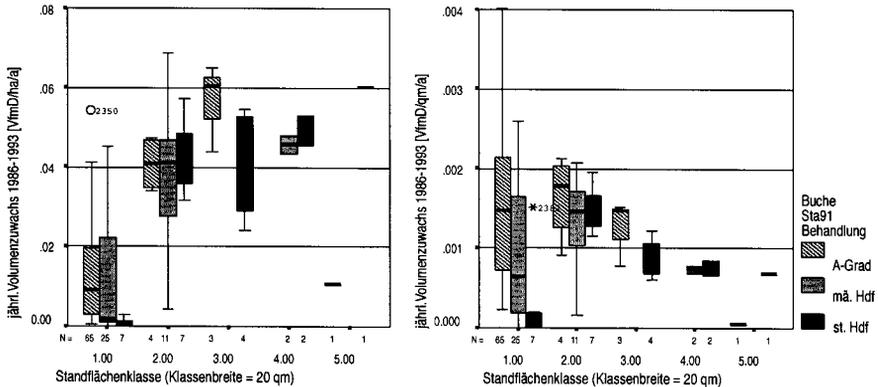


Abb. 8: Versuchsfläche Starnberg 91, dargestellt ist der laufende Volumenzuwachs pro Einzelbaum in Abhängigkeit von der Standfläche (links) und der laufende Volumenzuwachs pro Quadratmeter Standfläche (rechts) in Abhängigkeit von der Bestandesbehandlung als Box-Plot. (Für weitere Erläuterungen siehe Abbildung 3.) Die Standfläche der Einzelbäume wurde in Klassen mit einer Breite von jeweils 20 m² eingeteilt. (1 = 0–19,9 m², 2 = 20–39,9 m², 3 = 40–59,9 m², 4 = 60–79 m², 5 = ≥ 80 m²).

Fig. 8: Long-term trial Starnberg 91: Current annual volume increment of trees within different growing space classes (left) and current annual volume increment per m² ground area (right) in dependence on thinning intensity. (See Figure 3 for further explanations.) The growing space classes are distinguished as follows: 1 = 0–19.9 m², 2 = 20–39.9 m², 3 = 40–59.9 m², 4 = 60–79 m², 5 = ≥ 80 m².

durchforstung. Betrachtet man die Zuwachsleistung pro Quadratmeter Standfläche, so haben die Bäume mit den größten Standflächen einen vergleichbaren standflächenbezogenen Zuwachs wie Bäume mit mittleren Standflächen. Die Behandlungsvarianten mit mäßiger Niederdurchforstung und starker Niederdurchforstung fallen durch besonders hohe Zuwachsleistungen auf. Die Lichtungsparzelle, die einen Durchmesser Vorsprung von 14,2 cm gegenüber dem A-Grad aufweist, hat einen deutlich geringeren Zuwachs pro Quadratmeter Standraum als Parzellen, die in der Vergangenheit schwächer behandelt wurden.

Abschließend wird der Buchen-Durchforstungsversuch Starnberg 91 in die Betrachtungen einbezogen (Abb. 8). Mit steigender Standfläche nimmt der einzelbaumbezogene Zuwachs sprunghaft zu, um dann auf hohem Niveau zu verharren. Weitere Zunahmen in der Standfläche führen nur zu geringen Veränderungen in der Zuwachsleistung des Einzelbaumes. Standflächenbezogen bedeutet dies, dass mit zunehmender Standfläche die Produktivität pro Quadratmeter Standraum deutlich zurückgeht. Je stärker der Durchforstungseingriff ist, um so deutlicher tritt dieser Zuwachsrückgang auf.

Die Zusammenschau der standflächenbezogenen Zuwachsleistungen der unterschiedlichen Behandlungsvarianten für die einzelnen Versuche ist auf Abbildung 9 dargestellt. Grundsätzlich sinkt mit zunehmender Eingriffsstärke der standflächenbezogene Zuwachs. Auf Versuchsflächen, die eine moderate Staffelung der Eingriffsstärke aufweisen, wie die Flächen Denklingen 05 und Fabrikschleichach 15 (A-, B- und C-Grad), steigt zunächst sogar die standflächenbezogene Leistung an. Werden die Eingriffe sehr stark (Starnberg 91, starke Durchforstung oder Fabrikschleichach 15, Lichtung), dann sinkt die standflächenbezogene Zuwachsleistung wieder deutlich ab.

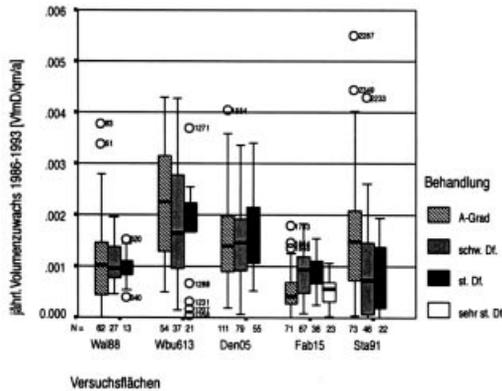


Abb. 9: Der laufende Volumenzuwachs pro Quadratmeter Standfläche für alle untersuchten Versuchsflächen (Waldleiningen 88 (Wal 88), Weissenburg 613 (Wbu 613), Denklingen 05 (Den 05), Fabrikschleichach 15 (Fab 15), Starnberg 91 (Sta 91)), in Abhängigkeit von der Bestandesbehandlung (vgl. Tab. 1) dargestellt als Box-Plot. (Für weitere Erläuterungen siehe Abbildung 3.)

Fig. 9: Current annual volume increment per m² ground area for all investigated trials (Waldleiningen 88 (Wal 88), Weissenburg 613 (Wbu 613), Denklingen 05 (Den 05), Fabrikschleichach 15 (Fab 15), Starnberg 91 (Sta 91)) in dependence on thinning intensity (see Table 1 for further information about the sites and Figure 3 for explanation of symbols).

5 Diskussion

Innerhalb eines Bestandes steigt mit zunehmendem Durchmesser und größer werdender Kronengrundfläche bzw. Standfläche der Einzelbaumzuwachs zunächst deutlich an. Bei maximalen Werten findet ein asymptotisches Einschwenken der Zuwachskurven statt.

Damit nimmt die stand- bzw. kronengrundflächenbezogene Leistung von großkronigen Bäumen ab (ASSMANN 1961, MAYER 1957). Diese Abnahme ist um so stärker ausgeprägt, je stärker der Wuchsbeschleunigungseffekt bereits abgeklungen ist. Besonders deutlich wird das im Versuch Fabriktschleibach 15, Parzelle 4. Die sehr starke Durchforstung seit dem Jahr 1932 (ASSMANN 1961) hat zu deutlich vergrößerten Kronen geführt, während der Volumenzuwachs der Einzelbäume heute auf ein sehr niedriges Niveau abgesunken ist. Im Jahr 2000 hat der A-Grad in diesem Versuch einen d_0 von 52,0 cm, der C-Grad von 63,0 und auf der Lichtungsfläche von 66,5 cm bei Vorräten von 955, 854 bzw. 614 VfmD/ha. Der Grenznutzen der starken Freistellung nimmt damit deutlich ab (PRETZSCH et al. 2002).

Die Analyse von Beständen aus verschiedenen Baumarten und Altersphasen bietet einen vielschichtigen Einblick in die Produktionsprozesse von Waldbeständen. Abhängig vom Ziel der Auswertung und der Stärke der Entnahmen zu Beginn der Beobachtungsperiode haben Standfläche und Kronengrundfläche eine unterschiedliche Aussagekraft. Im Bezug auf die Standraumökonomie von Bäumen liefern beide Bezugsgrößen interessante Ergebnisse. Nach starken Eingriffen gibt es die stärkste Diskrepanz zwischen dem zur Verfügung stehenden Standraum und dem effektiv von der Krone genutzten Standraum. Bei der vorliegenden Untersuchung wurde deshalb versucht, durch die Wahl der Versuchsflächen und Aufnahmezeitpunkte die Phase der aktiven Standraumerweiterung auszublenken. Je länger die jeweilige Standraumerweiterung durch Durchforstung zurück liegt, um so mehr sind die Bäume in der Lage, die frei gewordenen Lücken wieder zu schließen. Dies kann so effektiv geschehen, dass trotz deutlich reduzierter Grundfläche in den Beständen das Kronendach wieder geschlossen wird (SPIECKER 1991). Bei sehr starken Eingriffen, wie z. B. der Lichtung, und bei weniger plastischen Baumkronen als bei der Baumart Buche kann es auch dazu kommen, dass es keinen Bestandesschluss mehr gibt (ASSMANN 1961). Dies führt dazu, dass die Standfläche vom Baum nicht mehr effektiv ausgenutzt wird und die flächenbezogene Produktivität absinkt.

Das gewählte Verfahren der Standraumberechnung führt zu plausiblen Ergebnissen bei der Auswertung der Standraumökonomie von Bäumen. Methodisch ähnliche Untersuchungen z. B. von DEGENHARDT (2000) oder STERBA (2002) kommen zu vergleichbaren Schlussfolgerungen. Ein Nachteil des Verfahrens ist die Reduktion der dreidimensionalen Raumbesetzung auf eine Ebene, dies muss zu Unschärfen führen. Da Forstwirtschaft jedoch immer die Optimierung auf einer Bezugsfläche anstreben muss, wird diese Reduktion zur Klärung des Zusammenhanges zwischen Einzelbaumwachstum und Flächenproduktivität aber als sinnvoll erachtet.

Die Betrachtung der Standraumökonomie führt zu gut interpretierbaren Ergebnissen über das Wuchsverhalten von Bäumen unterschiedlicher Kronengröße. Wesentlich schwieriger sind diese Zusammenhänge bei Verfahren zu beurteilen, bei denen die räumliche Verteilung der Bäume in die Berechnungen eingeht. Die Wirkung der Konkurrenz wird dabei komplex bewertet und der Beitrag einzelner Faktoren erschließt sich nicht direkt. Solche Konkurrenzindizes werden erfolgreich in modernen Waldwachstumsmodellen (PRETZSCH et al. 2002) angewendet.

Standraumbetrachtungen erklären auch die zurückliegenden Zuwachsreaktionen auf Behandlungen. Die Ergebnisse können zwar zwischen den einzelnen Zuwachsperioden stark schwanken (SPIECKER 1991), wird das Durchforstungsprogramm schon längere Zeit durchgeführt, werden die Schwankung jedoch geringer.

Mögliche Ursachen für die zurückgehende Produktivität von großkronigen Bäumen sind sowohl auf Bestandesebene als auch auf Einzelbaubebene zu finden. Je größer die Krone, um so weniger effizient ist die Raumaussnutzung im Bestand. Sterben Bäume ab oder werden sie durch die Durchforstung entnommen, kommt dem Verhältnis zwischen der Stärke der Entnahmen und der Dynamik der Kronenausdehnung eine große Bedeutung zu. Diese Dynamik ist sehr stark von der Baumart und der jeweiligen Entwicklungs-

phase des Baumes bestimmt. Die Zwischensfelder im Bestand können von kleinkronigen Bäumen bis zum Erreichen des Kronenschlusses durch die herrschenden Bäume häufig effektiv genutzt werden, Zuwachseinbußen durch die Entnahme von herrschenden Bäumen können dadurch kompensiert werden (PRETZSCH 2002).

Je größer Kronen werden, um so ungünstiger wird ihr Oberflächen-Inhalts-Verhältnis (RUBNER 1931). Das bedeutet, dass ein großkroniger Baum ein ungünstigeres Verhältnis von Assimilation zu Respiration aufweist als ein kleinkroniger Baum, da die Atmungsverluste stärker zunehmen als die Assimilationsleistung (MURTY et al. 1996). Durch große Kronen, die intensiven Erneuerungsprozessen unterliegen, erfolgt die Allokation in Kompartimenten mit höheren Turnover-Raten (z. B. Nadeln, Feinreisig, Feinwurzeln) und der Energieverbrauch für die Erhaltung des Systems Baum nimmt zu (MAGNANI et al. 2000). Darüber hinaus steigt bei großkronigen Bäumen die Gefahr von Wasserstress und Nährstoffmangel (GOWER et al. 1996, OLSSON et al. 1998), dies reduziert wiederum die Assimilationsleistung.

Abschließend ist festzustellen, dass großkronige Bäume hohe einzelbaumbezogene Volumenzuwächse haben. Spitzenwerte in den hier untersuchten Beständen lagen bei 0,1 bis 0,15 VfmD/Jahr. Diese Werte stellen in den Datensätzen eine echte Obergrenze für die Bäume dar. Es zeigt sich, dass die Maximierung des Einzelbaumzuwachses durch sehr große Standflächen erkauft wird. Will man jedoch das Produktionspotential des Bestandes auch nur annähernd ausschöpfen, so stehen Fragen der Optimierung der Zuwachsleistung von Einzelbaum und Bestand im Vordergrund. Wird ein jährlicher Mindestzuwachs pro Hektar in Abhängigkeit von der Baumart und dem Standort gefordert, kann aus der Zuwachsleistung pro Baum und den Standraumansprüchen die benötigte Stammzahl/ha leicht ermittelt werden (UTSCHIG 2000). Untersuchungen von KLÄDTKE (2001) und von GUERIKE (2002) zeigen beispielhaft, welche Minimalbereiche der Stammzahlhaltung dabei nicht unterschritten werden sollten.

6 Literatur

- ASSMANN, E., 1965: Buchenlichtwuchsbetrieb, FwCbl, Jg. 84, H. 11/12, S. 329–346.
- ASSMANN, E., 1961: Waldertragskunde. BLV Verlagsgesellschaft München, 490 S.
- AURENHAMMER, F., 1991: Voronoi Diagrams – A Survey of a Fundamental Geometric Data Structure; ACM Computing Surveys, 23(3), 61 S.
- BROWN, G.S., 1965: Point density in Stems per Aere. New-Zealand For. Res. Notes Nr. 38.
- DEGENHARDT, A., 2000: Der Einfluss des Standraumes auf den Zuwachs von Kiefern AFZ/Der Wald, Jg. 55, H. 14, S. 734–736
- DESCARTES, R., 1644: Principia Philosophiae, nach OKABE, A., BOOTS, B., SUGIHARA, K. und CHIU, S. N., 2000: Spatial Tesselations – Concepts and Applications of Voronoi Diagrams; Second Edition, Wiley, Chichester, 671 S.
- FLEDER, W., 1987: Erziehungsgrundsätze für Buchenbestände. Forst und Holz, Nr. 2, S. 107–112.
- FREIST, H., 1962: Untersuchungen über den Lichtungszuwachs der Rotbuche und seine Ausnutzung im Forstbetrieb, Beih. z. FwCbl. Heft 17, 78 Seiten.
- GOWER, S., McMURTRIE, R.E., MURTY, D., 1996: Aboveground net primary production decline with stand age: potential causes. Trees, Jg. 11, H. 9, S. 378–382.
- GUERIKE, M., 2002: Untersuchungen zur Wuchsdynamik der Buche. Jg. 57, H. 11, S. 331–337.
- KENNEL, R., 1969: Formzahl- und Volumentafeln für Buche und Fichte. Institut für Ertragskunde der forstlichen Forschungsanstalt München, 55 S.
- KENNEL, R., 1965: Untersuchungen über die Leistung von Fichte und Buche im Rein- und Mischbestand. Teil 1 und Teil 2. AFJZ, Jg. 136, H. 7/8, S. 149–161, 173–189.
- KLÄDTKE, H.J., 2001: Konzepte zur Buchen-Lichtwuchsdurchforstung. AFZ/DerWald, Jg. 56, H. 20, S. 1047–1050.
- MAGNANI, F., MENCUCINI, M. und GRACE, J., 2000: Age-related decline in stand productivity: The role of structural acclimation under hydraulic constraints. Plant, Cell and Environment 23, S. 251–263.
- MAYER, R., 1957: Untersuchungen über Kronengröße und Zuwachsleistung der Traubeneiche auf süddeutschen Standorten. Dissertation Univ. München, Staatswirtschaftliche Fakultät, 132 S. zuzüglich Anhang.

- MURTY, D., McMURTIE, R.E. und RYAN, M.G., 1996: Declining forest productivity in aging forest stands: a modeling analysis of alternative hypotheses. *Tree Physiology* 16, S. 187–200.
- OLSSON, U., BINKLEY, D. und SMITH, F.W., 1998: Nitrogen Supply, Nitrogen Use and Production in an Age Sequence of Lodgepole Pine. *Forest Science*, Jg. 44, H. 3, S. 454–457.
- OKABE, A., BOOTS, B., SUGIHARA, K. und CHIU, S. N., 2000: *Spatial Tesselations – Concepts and Applications of Voronoi Diagrams*; Second Edition, Wiley, Chichester, 671 S.
- PRETZSCH, H., BIBER, P. und DURSKEY, J., 2002: The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation. *Forest Ecology and Management* 162, S. 3–21.
- PRETZSCH, H., 2002: *Grundlagen der Waldwachstumsforschung*. Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin, Wien, 460 S.
- PRETZSCH, H., UTSCHIG, H. und BACHMANN, M., 2002: Innovation durch Kontinuität. Das Ertragskundliche Versuchswesen in Bayern. In: BLEYMÜLLER, H., GUNDERMANN, E. und BECK, R., 2002: 250 Jahre Staatsforstverwaltung. Rückblicke, Einblicke, Ausblicke. Band 2, S. 425–444.
- PRETZSCH, H. und UTSCHIG, H., 1995: Die Eichen-Versuchsflächen im Forstamt Elmstein-Nord, AFZ 50. Jg., H. 2, S. 67–71.
- PREUHSLER, T. und SCHMIDT, R., 1989: Beobachtungen auf einem spät durchforsteten Fichten-Versuch. *Forstw. Cbl.*, Jg. 108, S. 271–288.
- PRODAN, M., 1968: Einzelbaum, Stichprobe und Versuchsfläche. *AFJZ*, Jg. 139, S. 239–248.
- RÖHLE, H., 1995: Zum Wachstum der Fichte auf Hochleistungsstandorten in Südbayern. *Mitteilungen aus der Bayerischen Staatsforstverwaltung*, Heft 48, 272 S.
- RUBNER, M., 1931: Die Gesetze des Energieverbrauchs bei der Ernährung. *Sitzber. preuß. Akad. Wiss. Physik.-Math. Kl. H.* 16/18, Berlin und Wien, 1902 S.
- SCHOBER, R., 1988: Von Zukunfts- und Elitebäumen, *AFJZ*, 159. Jg., H. 11/12, S. 239–249.
- SCHULZ, B., 1968: Programm zur Berechnung des Standraumes in einschichtigen Beständen (APAC), *AFJZ*, Jg. 139, S. 232–234.
- SEIFERT, S. und UTSCHIG, H., 2002: Standraum und Wachstum. Voronoi-Diagramme zur Bestimmung des Wuchsräume in Beständen. Posterbeitrag zur Forstwissenschaftlichen Tagung 2002 in Göttingen.
- SPÄTH, H., 1978: *Spline-Algorithmen zur Konstruktion glatter Kurven und Flächen*, 2. Aufl.; Oldenburg Verlag, München, 134 S., S. 45–52.
- SPIECKER, H., 1983: Durchforstungsansätze bei Eiche unter besonderer Berücksichtigung des Dickenwachstums. *AFJZ*, 154. Jg. H. 2, S. 21–36.
- SPIECKER, H., 1991: Zur Steuerung des Dickenwachstums und der Astreinigung der Trauben- und Stieleichen. *Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg*, Band 72, 155 S.
- STERBA, H., 2002: Schirmflächenleistung ein gutes Maß für Wachstumseffizienz? *Tagungsbericht Deutscher Verband forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde, Jahrestagung 2002 in Schwarzburg*, S. 149–158.
- UTSCHIG, H., 2000: Wachstum vorherrschender Buchen in Abhängigkeit von Standort und Behandlung. *Forst und Holz*. 55. Jg., H. 2: 44–50.
- UTSCHIG, H. und PRETZSCH, H., 2001: Der Eichen-Durchforstungsversuch Waldleiningen 88. Auswirkungen unterschiedlicher Eingriffsstärken nach 65 Jahren Beobachtung, *Forstw. Cbl.*, Jg. 120, S. 90–113.
- UTSCHIG, H., BACHMANN, M. und DURSKEY, J., 1993: Wirkung verschiedener Durchforstungen auf Struktur und Wachstum, Traubeneichen-Durchforstungsversuch 620, *AFZ*, 48. Jg., Heft 6, S. 271–274.
- VEREIN DEUTSCHER FORSTLICHER VERSUCHANSTALTEN, 1902: *Beratungen der vom Verein Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten zur Feststellung des neuen Arbeitsplanes für Durchforstungs- und Lichtungsversuche*. *Allg. Forst- und Jagdzeitung*, 78. Jg. S. 180–184.
- WENK, G., ANTANAITIS, V. und SMELKO, S., 1990: *Waldertragslehre*. Berlin, Deutscher Landwirtschaftsverlag, 448 S.
- WILHELM, G.J., LETTER, H.-A. und EDER, W., 1999: Konzeption einer naturnahen Erzeugung von starkem Wertholz, *AFZ/DerWald*, Jg. 54, H. 5, S. 323–240.
- WILHELM, G.J., 2002: Zur Feststellung und Interpretation von Schirmflächenleistung. *Tagungsbericht Deutscher Verband forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde, Jahrestagung 2002 in Schwarzburg*, S. 172–176.

Anschrift: Dr. HEINZ UTSCHIG, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Technische Universität München, Am Hochanger 13, D-85354 Freising, Deutschland, Tel.: ++49-8161-714710, Fax: ++49-8161-714721, E-Mail: H.Utschig@lrz.tum.de