

**R h e i n l a n d - P f a l z**

**Ministerium für Landwirtschaft, Weinbau und Forsten**

Mitteilungen aus der  
Forstlichen Versuchsanstalt  
Rheinland-Pfalz  
Schloß, D-6751 Trippstadt  
Telefon: 06306/8311



**Nr. 11/89**

**J .BLOCK, A. DEINET, M. HEUPEL,  
A. ROEDER, U. WUNN**

**Empirische, betriebswirtschaftliche  
und mathematisch-statistische  
Untersuchungen zur Wipfelköpfung  
der Fichte**

**ISSN 0931-9662**

## ZUR EINFÜHRUNG

Die Erhaltung, Begründung und Pflege wertvoller Wälder hoher Stabilität ist erklärtes Ziel der Landesforstverwaltung Rheinland-Pfalz. Darauf sind alle waldbaulichen Maßnahmen und betrieblichen Überlegungen zu orientieren. Standortgerechte Baumartenwahl und eine auf Stabilität ausgerichtete frühzeitige waldbauliche Steuerung des Waldwachstums - um nur zwei Maßnahmen zu nennen - sind wichtige Stützpfiler, um das übergeordnete Wirtschaftsziel zu erreichen.

Der Senkung des Produktionsrisikos kommt angesichts der langen Produktionszeiten für die Ertragssituation der Forstbetriebe erhebliche Bedeutung zu. Besonders hervorstechend sind neben der übergreifenden Immissionsbelastung die abiotischen Risikofaktoren Sturm und Schnee. Allein bei den Sturmschäden des Jahres 1984 sind im gesamten Waldbesitz des Landes 2.214 Mio fm Schadh Holz angefallen, davon 84 % Fichten. Dies belegt die beachtliche wirtschaftliche Dimension dieser Risiken mit hohen finanziellen Verlusten.

Die zunehmenden Belastungen der Wälder und der Waldböden durch Immissionen unterstreichen die Notwendigkeit, die Wälder des Landes auf diese neuartigen Risiken hin zu stabilisieren und herkömmliche abiotische und biotische Risiken so weit wie möglich zu reduzieren. Unter dem Eindruck zunehmender Waldschäden wurde es daher notwendig, der Praxis ein Konzept für die Fichtenwirtschaft anzubieten und Zug um Zug durchzusetzen. Sofern Wissenslücken vorhanden sind, müssen sie durch zielgerichtete Untersuchungen konsequent geschlossen werden. Insofern ist die Förderung und Verbreiterung des Versuchswesens, nicht zuletzt mit der Gründung der Forstlichen Versuchsanstalt im Jahre 1984, Teil eines forstpolitischen Gesamtkonzeptes.

Besonders betroffen von den Sturmschäden des Jahres 1984 war die von Gemeindewäldern geprägte Region des Vorderen Hunsrücks. Auf Anregung des Rhein-Hunsrück-Kreises, der betroffenen Gemeinden

und der Forstämter dieser Region wurde im Rahmen des Waldökoprogramms der Landesregierung ein Untersuchungsprogramm SIMS in Gang gesetzt, um mögliche Wechselwirkungen zwischen Immissions- und Sturmschäden in diesem Gebiet zu klären.

Die Koordination der Programme wurde der Forstlichen Versuchsanstalt übertragen. Das bodenkundliche Kernprojekt wird vom Institut für Bodenkunde und Waldernährung der Universität Göttingen durchgeführt. Im Zuge des breit angelegten Gesamtprojektes war es ein besonderes Anliegen, neben der Erarbeitung von bodenkundlichen und waldwachstumskundlichen Grundlagen, für die betriebliche Praxis konkrete Handlungsempfehlungen zur Stabilisierung gefährdeter Waldbestände zu erarbeiten. Daher wurde die Forstliche Versuchsanstalt beauftragt, projektbegleitende Untersuchungen im Rahmen des SIMS-Programmes anzuregen, zu koordinieren oder selbst durchzuführen.

Hierzu erfolgte unter Federführung der Abteilung "Waldschutz" der Forstlichen Versuchsanstalt mit Hilfe von Werkvertragspartnern eine großflächige Erhebung zur Genese der Sturmschäden im Vorderen Hunsrück, zu den Beziehungen zwischen Sturmholzanteil, Standort und Bestandesstruktur und zur Wirksamkeit waldbaulicher und technischer Maßnahmen zur Sturmschadensminderung.

Während der laufenden Untersuchungen wurden die vorläufigen Ergebnisse bereits jährlich den waldbesitzenden Gemeinden in der Region und der interessierten forstlichen Praxis vorgestellt und vor Ort im Untersuchungsgebiet diskutiert. Es ist mir ein besonderes Anliegen, dem Landrat des Rhein-Hunsrück-Kreises, den Ortsbürgermeistern der Gemeinden Kisselbach und Laudert, in deren Wäldern die Untersuchungen überwiegend durchgeführt werden, und den Mitarbeitern der Forstämter Simmern, Kastellaun und Kirchberg für die tatkräftige Unterstützung der Untersuchungen und die vielfältigen Anregungen zum Untersuchungsprogramm zu danken.

Ein technisches Mittel, um die Stabilität von exponierten und windwurfgefährdeten Waldrändern zu erhöhen, ist die sogen. Wipfelköpfung. Die Landesforstverwaltung hat diese Maßnahmen in der

Vergangenheit, besonders nach dem Sturm von 1984, mit beträchtlichen Mitteln gefördert (Tab. 1). Es war daher von erheblichem Interesse, die Wirksamkeit dieser Köpfungsmaßnahmen festzustellen und betriebswirtschaftlich zu durchleuchten. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Forstliche Betriebswirtschaft der Universität Freiburg wurden die Entscheidungskriterien für eine Wipfelköpfung analysiert und in einem Entscheidungsmodell bewertet.

Tab. 1: Förderung von Wipfelköpfungen im Körperschafts- und Privatwald Rheinland-Pfalz  
(nach Angaben aus den Wirtschaftsergebnissen bzw. Jahresberichten der LFV Rheinland-Pfalz 1986 und 1987, in Tausend DM)

FWJ	Körperschaftswald		Privatwald	
	Randlänge lfm	Förderung Tsd. DM	Randlänge lfm	Förderung Tsd. DM
1971-1980	22.594	34	1.960	6
1981	1.340	4	100	-
1982	2.486	7	130	1
1983	3.335	10	-	-
1984	2.330	13	380	3
1985	26.968	170	8.298	29
1986	12.743	86	221	1
1987	2.140	13	220	1,5
Sa.	73.936	337	11.309	41,5

Dieses Heft der Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt enthält die Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wipfelköpfungen im Rahmen des SIMS-Projektes, eine betriebswirtschaftliche Bewertung dieser technischen Sturmsicherungsmaßnahmen und ein mathematisches Modell zur Auswertung der Daten einer derartigen großstatistischen Erhebung. Der forstlichen Praxis werden hiermit unmittelbar Entscheidungshilfen für die Zweckmäßigkeit von Wipfelköpfungen unter unterschiedlichen Randbedingungen an die Hand gegeben.

Mainz, im Dezember 1989

A handwritten signature in cursive script, likely belonging to the author of the document.

**EMPIRISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR WIRKSAMKEIT VON WIPPELKÖPFUNGEN  
VON FICHTENBESTÄNDEN AUF PSEUDOGLEYBÖDEN**

**VON**

**M. Heupel, J. Block, A. Deinet, U. Wunn**

## **INHALTSVERZEICHNIS**

### **1. EINLEITUNG**

### **2. GRUNDLAGEN DER WIPFELKÖPFUNG**

2.1 Geschichte des technischen Sturmschutzes

2.2 Technik der Wipfelköpfung

### **3. MATERIAL UND METHODEN**

3.1 Datenerhebung

3.2 Mathematisches Modell

### **4. ERGEBNISSE**

4.1 Ergebnisse des tabellarischen Quotenvergleichs

4.2 Ergebnisse der statistischen Auswertung

4.3 Überlebensdauer geköpfter Bestände

4.4 Ergebnisse der Untersuchungen zum Ausführungsmodus  
und zu Bestandesparametern der Köpfungsbestände

### **5. DISKUSSION**

### **6. ZUSAMMENFASSUNG**

### **7. SUMMARY**

### **8. LITERATURVERZEICHNIS**

## 1. **EINLEITUNG**

Die Kronenentwipfelung - oder kurz Wipfelköpfung - von Randfichten zur Stabilisierung von sturmwurfgefährdeten oder bereits angerissenen Beständen ist eine in Rheinland-Pfalz häufig durchgeführte Maßnahme des technischen Sturmschutzes.

Mit der vorliegenden Untersuchung soll die **Wirksamkeit der Wipfelköpfung** und deren **Dauer** sowie deren Abhängigkeit von Parametern wie **Standort, Bestandesalter, Ausführungsmodus** oder **anderer Einflußgrößen** waldbautechnischer Natur überprüft werden.

Aufbauend auf einer ersten Erhebung von GALLUS und HEUPEL (1987) wird die Datenbasis erheblich erweitert. Damit wird eine statistische Auswertung und Absicherung der Aussagen ermöglicht.

Die der vorliegenden Arbeit vorausgegangenen Untersuchungen und Kartierungen sowie die Ergebnisdarstellungen beziehen sich auf das FWJ 1986, sofern im Text nichts anderes vermerkt ist.

Die Untersuchungen sollten ursprünglich wegen der größeren Homogenität der erhobenen Daten auf Forstämter des Vorderhunsrücks beschränkt werden. Die Anzahl der in diesem Bereich wipfelgeköpften Bestände erschien aber für eine statistische Auswertung und gesicherte Aussagen zu gering, sodaß das Untersuchungsgebiet auf weitere Forstämter ausgedehnt werden mußte. Hierdurch flossen auch Erfahrungen aus anderen Wuchsgebieten in die Untersuchung ein.

## 2. GRUNDLAGEN DER WIPFELKÖPFUNG

### 2.1 Geschichte des technischen Sturmschutzes

Verschiedene Methoden des technischen Sturmschutzes wurden in der Vergangenheit angewendet, aber infolge unzureichender Schutzwirkung und zu hoher Kosten wieder verworfen.

In der Literatur werden folgende Maßnahmen des technischen Sturmschutzes beschrieben:

- der Windschlot  
(BARGMANN, 1904; ROßMÄßLER, 1920; EULEFELD, 1921;  
WOELFLE, 1937; BINDSEIL, 1958; HÜTTE, 1964a;  
ROTTMANN, 1986; HORNDASCH, 1987)
- die mechanische Verankerung von Bestandesrändern  
(JUNGHANS, 1957; SIEBENBAUM, 1958; HÜTTE, 1967a;  
ROTTMANN, 1986; HORNDASCH, 1987)
- die Verkettung von Traufbäumen  
(STACH, 1925,1926; HÜTTE, 1967a; ROTTMANN, 1986)
- die Beschwerung von Wurzeltellern  
(REUß, 1889; HESS-BECK, 1930; ROTTMANN, 1986)
- die einseitige Aufastung  
(ROßMÄßLER, 1928; HESS-BECK, 1930; GEHRHARDT, 1932  
FRITZSCHE, 1933; ZENTGRAF, 1938; HÜTTE, 1964a)
- die Schutzastung und  
(YELIN, 1886; HÜTTE, 1964a; MITSCHERLICH, 1973;  
ROTTMANN, 1986)
- die Wipfelköpfung

Lediglich die **Wipfelköpfung** erhielt innerhalb des technischen Sturmschutzes größere Bedeutung. Sie wird erstmals von RÜCKER in der Allgemeinen Forst- und Jagdzeitung 1848 erwähnt. Er forderte, daß "junges Holz an den Seitenrändern, wenn es 15 bis 20 Fuß Höhe erreicht hat, völlig entwipfelt werden muß. ... Diese Entwipfe-

lung, bei der sich die Fichten buschig in die Äste ausbreiten, soll man in Abstufungen nach innen zu anwenden, ..." (zit. nach HÜTTE, 1964a).

EIFERT beschreibt 1903 ein Verfahren, bei dem "die Randbäume zurückzuschneiden" seien.

Weiter verbreitet und ausgearbeitet wurde die Wipfelköpfung durch STOCK (1926). Er weist darauf hin, daß durch die Verringerung der Windangriffsfläche und Verkürzung des Schaftes (Hebelarm) die Standfestigkeit des Einzelbaumes erhöht werden könne.

BEYREUTHER (1958) entnimmt in über 60-jährigen Beständen auf einer 20 - 30 m tiefen Zone 2 - 5 m lange Kronenstücke, entsprechend der Entfernung zum Bestandesrand, und in jüngeren Beständen 30 - 50 % aller Äste auf der Leeseite der Krone. Je 100 lfm werden so im Bestandesrand 50 - 80 Bäume behandelt. Eine Nachköpfung erfolgt nötigenfalls nach fünf bis sieben Jahren.

Die großen Sturmkalamitäten der 60er Jahre brachten die Wipfelköpfung wieder verstärkt in die Diskussion.

MASCHER (1965) und OEHLER (1967), die Sturmschäden von 1955 und 1966 untersuchten, bewerteten die Wipfelköpfung positiv.

VON JENA (1967) und WINTERFELD (1967) steuerten Erfahrungen aus Niedersachsen bei, wobei WINTERFELD die Köpfung mit einer leeseitigen Aufastung zur Schwerpunktverlagerung auf die Luvseite verband.

FRÖMSDORF (1967) hatte im Forstamt Wellerode bei Kassel nur mäßigen Erfolg mit Köpfungsmaßnahmen, während VOLK (1968) sie in angerissenen Beständen für "mancherorts unumgänglich" hält.

HORNDASCH (1971) lehnt alle technischen Sturmschutzmaßnahmen mit der Begründung ab, daß sie "mit den Grundsätzen der Landschaftspflege unvereinbar", "waldfremd, kostspielig" seien und ihren Zweck nicht erfüllten.

Ausführlich beschäftigt sich HÜTTE seit 1964 mit der Wipfelköpfung (1964 a, b; 1967 a, b; 1969; 1971; 1983; 1986). Er entwickelte in Freiland-Großversuchen des Instituts für Waldbau-technik der Universität Göttingen ein Verfahren, das heute i.d.R. als Grundlage für die Durchführung von Köpfungsmaßnahmen verwendet wird (vgl. Kap. 2.2)

Seine Untersuchungen zur Erfolgsquote von Wipfelköpfungen in Abhängigkeit von Durchforstungsstärke und Standort ergeben, daß sich das Verfahren bei einem Bekronungsgrad > 30 % bewährt; Mißerfolge treten lediglich auf stark stauwasserbeeinflußten Standorten ein. In Beständen mit einem Bekronungsgrad von etwa 20 % bleibt die Sicherungswirkung der Wipfelköpfung unbefriedigend, sodaß sie für schwach niederdurchforstete und undurchforstete Bestände nicht empfohlen wird (HÜTTE, 1983; vgl. Tab. 1).

**Tab. 1:** Wirkung der Kronenentwipfelung in Abhängigkeit von Standort und Kronenlänge (nach HÜTTE, 1983)  
*Effect of crown topping dependent on site and crown length (acc. HÜTTE, 1983)*

Stauhorizont in cm Bodentiefe	Kronenlänge in % der Gesamtblaumlänge										insgesamt			
	20%		30%		40%		50%		üb.60%		Flächen	%	davon	
	beh. Flä. m.E.	o.E.	beh. Flä. m.E.	o.E.	beh. Flä. m.E.	o.E.	beh. Flä. m.E.	o.E.	beh. Flä. m.E.	o.E.			m.E.	o.E.
20 - 40 cm	0	5	3	2	6	0	4	1	0	0	21	11	13	8
41 - 60 cm	0	1	9	1	49	4	22	0	5	0	91	49	85	6
tiefer als 60 cm	1	0	5	0	23	1	7	0	4	0	41	22	40	1
ohne Stauhorizont	2	2	4	0	12	0	10	0	3	0	33	18	31	2
Fläche insgesamt	3	8	21	3	90	5	43	1	12	0	186		169	17
%	6%		13%		51%		24%		6%		100%		90,9%	9,1%
beh. Flä. = behandelte Flächen - m.E. = mit Erfolg - o.E. = ohne Erfolg														

## 2.2 Technik der Wipfelköpfung

Die von HÜTTE 1964 zur Durchführung von Wipfelköpfungen entwickelte Verfahrenstechnik wurde in einem Merkblatt des Instituts für Waldbau-Technik der Universität Göttingen zusammengefaßt, in dem neben der eigentlichen Köpfung noch flankierende Maßnahmen empfohlen werden. Dieses Merkblatt sei zur Erläuterung der Technik im folgenden zitiert:

### "1.) Verfahren

- a) Begradigung des Bestandesrandes angebrochener Fichtenbestände,
- b) Entnahme der unterdrückten, absterbenden und einiger zwischenständiger Stämme (die Windströmung soll nicht gestaut und abgeleitet, sondern gefiltert werden),
- c) auf staunassen Standorten Anlage eines Grabens parallel zum Bestandesrand (Abstand vom Bestandesrand 3 - 5 m)
- d) Abdachung des Bestandesrandes mittels Wipfelköpfung zur Vermeidung künstlicher Steilränder im Kronendach. Es werden die herrschenden und vorherrschenden Fichten entwipfelt und zwar in der Weise, daß Randstämmen mindestens 50 % (höchstens 60 %) der Kronenlänge entnommen wird. Es ist darauf zu achten, daß stets mehr als 1/3 der Krone erhalten bleibt. Die Behandlungstiefe soll eine Baumlänge betragen. (Stangenholz 15 m; starkes Baumholz 30 - 35 m). Zwei Baumlängen vom Bestandesrand entfernt stehende Beobachter sollten keine Fichtenkrone aus dem geschützten Bestand herausragen sehen. Auf nassen Standorten wird ggf. die Entwipfelung vorherrschender Stämme im nachgelagerten Bestand erforderlich.
- e) Verringerung der Windangriffsfläche durch Entnahme dichtbenadelter, senkrecht zum Wind und dem Wind entgegenstehender Äste aus dem Kronenrest der entwipfelten Fichte. Durch die zusätzliche Astung wird die Wirksamkeit der Maßnahme verlängert, da insbesondere die dem Wind entgegenstehenden Äste für den Baum gefährlich werden, wenn sie sich nach einigen Jahren wieder aufrichten und neue Wipfel bilden.
- f) Behandlung der Schnittflächen mit Holzteer, Xylamon oder Karbolineum (insbesondere in jüngeren Fichtenbeständen).
- g) Erneute Absicherung des Bestandesrandes, wenn einzelne Stämme des Traufs infolge Trocknis oder Sturmwurfs vorzeitig ausscheiden.

Die empfohlenen Maßnahmen sichern die angebrochenen Bestände nur dann, wenn sie in Verbindung mit der Entwipfelung angewandt werden. Die Begradigung eines Bestandesrandes ohne seine gleichzeitige Entwipfelung kann z. B. die Gefährdung durch den Sturm eher erhöhen als verringern.

## 2.) Kosten

Die Kosten der Wipfelköpfung sind abhängig von der Länge der Fichten und vom Bestockungsgrad des abzusichernden Bestandes. Die Entwipfelung von Einzelstämmen ist erheblich teurer als die Absicherung überbestockter Bestände, in denen die mit der Wipfelköpfung beauftragten Arbeiter von Stamm zu Stamm überschwingen können, ohne stets abbaumen zu müssen."

Aktuelle, repräsentative Kostensätze in Abhängigkeit von Ertragsklasse und Bestandesalter finden sich im Beitrag von ROEDER und DEINET im gleichen Heft.

Zur Vervollständigung der Köpfungstechnik muß ferner die Nachköpfung behandelter Bestände angesprochen werden. Sie erfolgt in zeitlichen Abständen von etwa fünf bis zehn Jahren in Abhängigkeit von der Höhenzuwachsleistung des Bestandes, so daß entstehende Steilstufen zwischen Köpfungszone und Hauptbestand in der Bestandesoberfläche beseitigt werden.

HÜTTE (1986) empfiehlt zur Stabilisierung der geschwächten Bäume eine Vitalisierungsdüngung nach der Behandlung.

### 3. MATERIAL UND METHODEN

#### 3.1 Datenerhebung

Als Maß für die Wirksamkeit der Wipfelköpfungen wird der Anteil der geköpften Bestände angesehen, der bei sonst gleichen Bedingungen die Lebensdauer ungeköpfter Bestände überschreitet. Erst der Vergleich mit ungeköpften Beständen läßt einen Rückschluß auf die absolute Wirksamkeit der Wipfelköpfung zu.

Methodisch eindeutig können solche Vergleiche von geköpften und ungeköpften Beständen in gezielten Versuchen durch Pärchenvergleiche auf räumlich eng benachbarten Standorten durchgeführt werden. Dabei muß darauf geachtet werden, daß die Ausgangssituation hinsichtlich der prädisponierenden Faktoren voll übereinstimmt. Eine solche experimentell ausgerichtete Versuchsreihe stand zur Beantwortung der eingangs gestellten Fragen jedoch nicht zur Verfügung. Daher mußte auf die Möglichkeiten einer massenstatistischen Auswertung abgehoben werden, um Beziehungen zwischen den verschiedenen Einflußgrößen zu analysieren.

Dabei konnte auf die Untersuchungen von GALLUS und HEUPEL (1987) in den Forstämtern Kastellaun und Kirchberg zurückgegriffen werden. Der geringe Datenumfang dieser Untersuchung schränkte eine statistische Analyse allerdings erheblich ein.

Aus diesem Grund wurde die vorliegende Untersuchung auf weitere Forstämter des Wuchsgebietes Vorderer Hunsrück sowie des Soonwaldes und des Westerwaldes ausgedehnt. Das verwendete Datenmaterial stammt aus dokumentierten Köpfungsmaßnahmen der Forstämter Boppard, Entenpfuhl, Kastellaun, Kirchberg, Montabaur, Rennerod, Rhaunen, Simmern, St. Goar und Zell.

Innerhalb der ausgewählten Forstämter wurden für die Köpfungsmaßnahmen die Ausführungsnachweise erfaßt und die Revierleiter dazu befragt. Folgende Parameter wurden erfaßt:

- 1.) Zeitpunkt der Maßnahme
- 2.) Bestandesalter zum Zeitpunkt der Köpfung

- 3.) nach der Köpfung erfolgte Sturmwürfe
- 4.) die standörtlichen Verhältnisse
- 5.) ertragskundliche Daten
- 6.) der angewendete Ausführungsmodus bei der Köpfung  
(z.B. entnommene Kronenanteile, Tiefe der Köpfungszone, Zusatzastungen, Nachköpfungen)
- 7.) allgemeine Fragen  
(z. B. räuml. Ordnung, biotische Schäden, allgemeine Sturmwurfsituation)

Eine Bereisung der Erhebungsbestände erfolgte nur in Einzelfällen, da ein erheblicher Teil der geköpften Bestände bereits dem Sturm zum Opfer gefallen war. Andererseits konnten einige der aufgeführten Parameter nur mit Hilfe der Revierbeamten und ihres Erinnerungsvermögens erhoben werden. Alle nicht schriftlich fixierten Bestandesparameter wie bspw. Bekronungsgrad, Schlankheitsgrad oder Köpfungsgang mußten über Schätzungen der Revierbeamten erhoben werden. Je länger die Maßnahmen zurückliegen, desto geringer ist zwangsläufig die Genauigkeit der erhobenen Daten. Allerdings variieren diese genannten Merkmale nicht sehr stark, so daß dem subjektiven Moment in den Aussagen der Revierleiter kein ausschlaggebender Einfluß beigemessen werden muß.

Insgesamt wurden 311 **Wipfelköpfungsmaßnahmen** erfaßt, wovon 256 in die Auswertung einbezogen wurden. Die übrigen 55 Bestände konnten nicht verwendet werden, da sie nach 1986 geköpft wurden oder aus sonstigen Gründen (z. B. Köpfung von Süd- und Osträndern) nicht mit dem anderen Datenmaterial vergleichbar waren.

Mit Hilfe der engagierten Mitarbeit der Amtsleiter und Revierbeamten konnten Köpfungsmaßnahmen bis Anfang der 60er Jahre rekonstruiert werden; die ältesten in die Auswertung einbezogenen Maßnahmen fanden 1957 und 1958 statt. Die überwiegende Mehrzahl der Maßnahmen erfolgte nach 1970.

Neben den Daten der Köpfungsbestände wurden als **nicht geköpfte Vergleichsbestände** die Daten von 600 unbehandelten Beständen in die Untersuchung einbezogen. Diese Daten stammen ausschließlich aus einer von GALLUS und HEUPEL im Jahr 1987 durchgeführten Aufnahme im Forstamt Kirchberg.

Das methodische Vorgehen bei der Auswahl des Vergleichskollektivs weist im wesentlichen folgende zwei Nachteile auf, die in entgegengesetzte Richtungen wirken.

Zum einen sind in der Praxis geköpfte Bestände wohl bereits sturmgefährdeter als ungeköpfte Vergleichsbestände. Zu einer kostenintensiven Maßnahme wie der Wipfelköpfung wird man in der Regel nur greifen, wenn sich eine akute Gefährdung wie durch angebrochene Ränder, entfallener Deckungsschutz durch vorgelagerte Bestände u.ä. abzeichnet. Diese Tendenz dürfte sich im Datenmaterial in einer verringerten Wirksamkeit der Wipfelköpfung niederschlagen.

Zum anderen stimmt die Grundgesamtheit, der die geköpften Bestände entnommen wurden (10 Forstämter aus dem nördlichen Rheinland-Pfalz), nur teilweise mit der überein, aus der die ungeköpften Vergleichsbestände stammen (Forstamt Kirchberg). Das Forstamt Kirchberg weist ein relativ höheres Sturmschadensniveau auf als die anderen in die Untersuchung einbezogenen Forstämter. Die Wirksamkeit der Wipfelköpfung müßte daher beim Vergleich beider Kollektive deutlich erhöht erscheinen.

Nach Abschluß der Aufnahmen wurde das gesammelte Datenmaterial für die Auswertung aufbereitet. Jeder Bestand wurde entsprechend der Zielsetzung der vorliegenden Untersuchung nach den Merkmalen klassifiziert :

- a) geworfen / nicht geworfen
- b) geköpft / nicht geköpft
- c) Altersklasse (I, II, III, IV, V)
- d) Standortgrundform (≤VII, VIII, IX/X)

- ad a) Ein Bestand wurde als "geworfen" eingestuft, sofern er nach der Köpfungsmaßnahme  $\geq 30\%$  des Vorrates durch Sturmwurf eingebüßt hatte. Dieser Wert wurde etwas vorsichtiger angesetzt als der von THOMASIVS (1973) ermittelte kritische Wert für den Grundflächenverlust von  $15\%$ , oberhalb dessen es zu Zuwachsverlusten kommt.
- ad c) die Altersklasse des Bestandes in 20 jährigen Stufen wurde für den Zeitpunkt der Köpfungsmaßnahme bestimmt
- ad d) die Standortsgrundform wurde der Standortkarte entnommen; unter Standortsgrundformen wird entsprechend der Kartieranweisung für den Staatswald Rheinland-Pfalz eine Aufgliederung der Standorte nach überwiegenden Expositions-, Relief-, Stau- und Grundwassereinflüssen verstanden.

- Grundform  $\leq$ VII:

Standorte ohne Wassereinfluß bzw. mit Vergleyung im Unterboden höher als 65 cm unter der Mineralbodenoberfläche

- Grundform VIII:

Standorte mit Vergleyung im tieferen Oberboden, höher als 45 cm unter der Mineralbodenoberfläche

- Grundform IX/X:

Standorte mit Vergleyung im ganzen Oberboden höher als 25 cm unter der Mineralbodenoberfläche bzw. mit zusätzlicher stärkerer organischer Auflage von 11-30 cm Mächtigkeit

Der anschließende Vergleich des Verhaltens der geköpften und der ungeköpften Bestände nach der Köpfungsmaßnahme - nach Standortsgrundform und Altersklasse differenziert - sollte statistisch abgesicherte Aussagen hinsichtlich der Wirksamkeit von Wipfelköpfungen ermöglichen.

Neben diesen Vergleichen sollen die anderen Daten, insbesondere zur Kennzeichnung des Ausführungsmodus und der Bestände, Erklärungen für Erfolg und Mißerfolg von Köpfungsmaßnahmen ermöglichen.

Neben den Vergleichen aller aufgenommenen Köpfungsmaßnahmen wurde eine Auswertung unter Ausschluß der Sturmschäden aus dem FWJ 1984/85 in Köpfungsbeständen durchgeführt. Diese Auswertung sollte der Frage nachgehen, ob sich ein grundsätzlich anderes Bild

zeigt, wenn der Sturm vom 23./24. Nov. 1984, der häufig als "Jahrhundertsturm" angesehen wird, aus der Betrachtung ausgeschlossen wird.

### 3.2 Mathematisches Modell

Um einen ersten Überblick über das gesamte Datenmaterial zu erhalten, werden die klassifizierten Daten in Tabellen, sog. **Kontingenztafeln**, angeordnet.

In einem zweiten Schritt wird das Datenmaterial unter Verwendung statistischer Modelle eingehend analysiert.

Da die Daten höchstens ordinal skaliert sind, können die herkömmlichen varianzanalytischen Methoden nicht angewendet werden. Vielmehr waren auf die spezifische Datenstruktur abgestimmte nicht parametrische Modelle (sog. loglineare Modelle) zu entwickeln.

Die verschiedenen, in die Auswertung einfließenden Parameter, wie Altersklasse, Standortgrundform, Standfestigkeit und Behandlung, werden damit auf Wechselbeziehungen und Abhängigkeiten überprüft. Die Auswertung stützt sich somit auf die Gesamtheit *aller* Bestände, d. h. auf nicht geköpfte **und** geköpfte Bestände.

Die zum Verständnis der Ergebnistabellen notwendigen Grundlagen dieser Methode sind nachfolgend kurz beschrieben. Eine detaillierte Methodenbeschreibung enthält der Beitrag von WUNN im gleichen Heft.

**Tab. 2: Beschreibung der untersuchten Merkmale**  
*Description of variables under investigation*

VARIABLE/MERKMAL	AUSPRÄGUNG
Standfestigkeit (Zielvariable)	1 = geworfen 2 = nicht geworfen
Wipfelköpfung (Merkmal j)	1 = geköpft 2 = nicht geköpft
Altersklasse (Merkmal k)	1 = Altersklasse II 2 = Altersklasse III 3 = Altersklasse IV 4 = Altersklasse V
Standorts- grundform (Merkmal l)	1 = Standortsgrundform <VII 2 = Standortsgrundform VIII 3 = Standortsgrundform IX/X

Mit der Variablenbeschreibung aus Tabelle 2 ergibt sich folgender allgemeiner Modellansatz:

$$\ln \frac{m_{1jkl}}{m_{2jkl}} = W + W_1(j) + W_2(k) + W_3(l) + W_{12}(jk) + W_{13}(jl) + W_{23}(kl) + W_{123}(jkl),$$

für alle  $j = 1, 2,$   
 $k = 1, 2, 3, 4, l = 1, 2, 3.$

Wobei  $m_{1jkl}$ : Anzahl der geworfenen Bestände mit den Merkmalsausprägungen  $j, k, l$  und

$m_{2jkl}$ : Anzahl der nicht geworfenen Bestände mit den Merkmalsausprägungen  $j, k, l$

Für das Verhältnis  $\frac{m_{1jkl}}{m_{2jkl}}$  folgt dann:

$$\frac{m_{1jkl}}{m_{2jkl}} = \exp [ W + W_1(j) + W_2(k) + W_3(l) + W_{12}(jk) + W_{13}(jl) + W_{23}(kl) + W_{123}(jkl) ]$$

$$= \exp(W) \exp(W_1(j)) \exp(W_2(k)) \exp(W_3(l)) \exp(W_{12}(jk)) \exp(W_{13}(jl)) \cdot \exp(W_{23}(kl)) \exp(W_{123}(jkl))$$

Mit diesem Modellansatz können mehrdimensionale Abhängigkeiten der beteiligten Variablen aufgedeckt werden. Ohne einen solchen Modellansatz können Wechselwirkungen, an denen mehrere Variablen gleichzeitig beteiligt sind, i.a. nur sehr schwer aus den Kontingenztafeln bestimmt werden.

Mehrere Algorithmen ermöglichen es, einzelne Parameter auszuwählen und auf Signifikanz zu testen. Wechselwirkungen, die keinen Einfluß besitzen, werden im oben beschriebenen allgemeinen Modellansatz eliminiert.

Für einen Parameter  $w_0 < 0$  gilt  $\exp(w_0) < 1$ , d.h. der Einfluß der Wechselwirkung  $\Theta$  vergrößert den Nenner des Verhältnisses

$\frac{m_{1jkl}}{m_{2jkl}}$  (geworfen/nicht geworfen). Dies bedeutet, daß die be-

trachtete Merkmalskombination mit einem größeren Anteil nicht geworfener Bestände zusammenhängt.

Werte  $w_0 > 0$  bzw.  $\exp(w_0) > 1$  vergrößern den Zähler; die Merkmalskombination deutet in Richtung auf größere Anteile geworfener Bäume.

Werte  $w_0 = 0$  bedeuten, daß die Wechselwirkung  $\Theta$  keinen Einfluß auf das Verhältnis hat; die Merkmalskombination ist indifferent.

Die Auswertung wurde mit dem Programmpaket SPSS.X (Statistical Package for the Social Sciences) durchgeführt.

## 4. ERGEBNISSE

### 4.1 Ergebnisse des tabellarischen Quotenvergleichs

Ein tabellarischer Vergleich der Quoten "geworfen/nicht geworfen" aller behandelten Bestände ermöglicht eine erste Beurteilung der relativen Wirkung der durchgeführten Wipfelköpfungen. Diese Methode wurde von HÜTTE (1983) angewendet (vgl. Kap. 2.1, Tab. 1). Alle Köpfungsbestände (=Stichprobeneinheiten), die zum Zeitpunkt der Aufnahme nicht geworfen sind, gelten dort als "mit Erfolg" (mE) behandelt.

Diese Methodik der Erfolgsbeurteilung bezieht sich allerdings ausschließlich auf die Grundgesamtheit der geköpften Bestände und erlaubt so lediglich den Rückschluß auf die relative Stabilität von Standorten und Altersklassen. Andernfalls impliziert sie die sehr weitgehende Annahme, daß der betreffende Bestand ohne die Wipfelköpfung sofort geworfen worden wäre.

**Tab. 3:** Wirkung der Wipfelköpfung  
(Quotenvergleich)  
*Effect of crown topping - Comparison of ratios*

Standorts- grundform	A L T E R S K L A S S E								Σ standortsgrundform			
	II		III		IV		V		mE		oE	
	mE	oE	mE	oE	mE	oE	mE	oE	abs. rel.	abs. rel.	abs. rel.	abs. rel.
≤ VII	22	6	17	9	14	5	8	2	61	73	22	27
VIII	12	9	6	11	8	6	4	7	30	48	33	52
IX/X	19	22	12	24	4	18	4	7	39	35	71	65
abs. (Stck)	53	37	35	44	26	29	16	16	130		126	
Σ rel. (%)	59	41	44	56	47	53	50	50	51		49	

In jungen Beständen scheint die Erfolgsquote bei den Standortsgrundformen  $\leq$  VII höher als die Mißerfolgsquote zu sein.

In den Altersklassen III - V ergibt sich eine Erfolgsquote von ca. 50 %.

Auf den Standortsgrundformen  $\leq$  VII liegt die Erfolgsquote bei ca. 73 %. Für stärker stau- und grundwasserbeeinflusste Standorte fällt sie auf weniger als 50 %.

Werden alle geköpften Bestände zusammen betrachtet, so haben trotz der Köpfung nur etwa die Hälfte die Stürme überdauert.

#### 4.2 Ergebnisse der statistischen Auswertung

Um Abhängigkeiten zwischen den aufgenommenen Parametern und deren Einfluß auf die Standfestigkeit der Bestände im Datenmaterial erkennen zu können, wird ein Logit-Modell an die Daten angepaßt. Dadurch können mehrdimensionale Zusammenhänge zwischen den Parametern aufgedeckt und interpretiert werden. Gleichzeitig werden Effekte, die keinen signifikanten Einfluß auf die Standfestigkeit zeigen, nach kritischer Würdigung eliminiert.

Tabelle 4 enthält alle Daten der geköpften und nichtgeköpften Bestände der vorliegenden Untersuchung. Das nach Eliminierung nicht signifikanter Effekte resultierende Modell lautet :

$$\ln \frac{m_{1 j k l}}{m_{2 j k l}} = w + w_1(j) + w_2(k) + w_3(l) + w_{12}(jk)$$

Für das Verhältnis  $\frac{m_{1 j k l}}{m_{2 j k l}}$  gilt dann:

$$\frac{m_{1 j k l}}{m_{2 j k l}} = \exp [ w + w_1(j) + w_2(k) + w_3(l) + w_{12}(jk) ],$$

$$j = 1, 2 ; k = 1, 2, 3, 4 ; l = 1, 2, 3 .$$

Die eliminierten Effekte betreffen die Mehrfachwechselwirkungen zwischen folgenden Merkmalen:

- a) "Wipfelköpfung" und "Standortsgrundform",
- b) "Altersklasse" und "Standortsgrundform" sowie
- c) "Wipfelköpfung", "Altersklasse" und "Standortsgrundform"

Sie haben offenbar auf die Zielvariable "Standfestigkeit" keinen nachweisbaren Einfluß.

In Tabelle 5 sind alle Parameter  $w_0$  und ihre Funktionswerte  $\exp(w_0)$  zusammengefaßt.

**Tab. 4:** Kontingenztafel aller aufgenommenen Bestände  
*Contingency table of all investigated stands*

a) Standfestigkeit : geworfen Wipfelköpfung : geköpft			Altersklasse			
	$n_{k1}$	II	III	IV	V	
Standorts-	≤VII	6	9	5	2	
grund-	VIII	9	11	6	7	
form	IX/X	22	24	18	7	
b) Standfestigkeit : geworfen Wipfelköpfung : nicht geköpft			Altersklasse			
	$n_{k1}$	II	III	IV	V	
Standorts-	≤VII	1	5	13	9	
grund-	VIII	3	36	46	31	
form	IX/X	11	35	25	12	
c) Standfestigkeit : nicht geworfen Wipfelköpfung : geköpft			Altersklasse			
	$n_{k1}$	II	III	IV	V	
Standorts-	≤VII	22	17	14	8	
grund-	VIII	12	6	8	4	
form	IX/X	19	12	4	4	
d) Standfestigkeit : nicht geworfen Wipfelköpfung : nicht geköpft			Altersklasse			
	$n_{k1}$	II	III	IV	V	
Standorts-	≤VII	53	22	25	30	
grund-	VIII	47	24	19	18	
form	IX/X	22	13	4	4	

**Tab. 5:** Berechnete Modellparameter für alle aufgenommenen Bestände  
*Model parameters calculated for all investigated stands*

Zeile	Parameter $w_0$	Wert	$\exp(w_0)$
1	w	-0,2218	0,80
2	$w_1(1)$	0,1170	1,12
3	$w_1(2)$	-0,1170	0,88
4	$w_2(II)$	-1,1836	0,31
5	$w_2(III)$	0,3232	1,38
6	$w_2(IV)$	0,5816	1,79
7	$w_2(V)$	0,2788	1,32
8	$w_3(VII)$	-1,1998	0,30
9	$w_3(VIII)$	0,2340	1,28
10	$w_3(IX/X)$	0,9658	2,63
11	$w_{12}(III1)$	0,7028	2,02
12	$w_{12}(II2)$	-0,7028	0,50
13	$w_{12}(III1)$	-0,0650	0,94
14	$w_{12}(III2)$	0,0650	1,07
15	$w_{12}(IV1)$	-0,4002	0,67
16	$w_{12}(IV2)$	0,4002	1,49
17	$w_{12}(V1)$	-0,2376	0,79
18	$w_{12}(V2)$	0,2376	1,27

Die Parameter  $w_1(1)$  und  $w_1(2)$  beschreiben den Einfluß der Köpfung auf das Verhältnis der geworfenen zu den nicht geworfenen Beständen (Zeilen 2,3). Dieser Einfluß scheint einige Besonderheiten zu zeigen.

Entsprechend den Erläuterungen in Kap. 3.2 bedeutet ein Wert von 1,12 für  $\exp(w_1(1))$ , daß geköpftete Bestände trotz dieser Sicherungsmaßnahme zu einem höheren Anteil geworfen werden als ungeköpftete (0,88).

Dieses Ergebnis erstaunt auf den ersten Blick; als mögliche Erklärung bietet sich an, daß nur besonders sturmexponierte und gefährdete Bestände geköpft werden. Diese neigen bereits in ihrer Grundtendenz eher dazu, geworfen zu werden als die ungeköpften Vergleichsbestände.

Das Ergebnis dieser statistische Analyse wirft allerdings die Frage auf, ob Wipfelköpfungen in ausreichendem Maße geeignet sind, zu einer Verringerung des Sturmschadensrisikos beizutragen.

Analysiert man den **Einfluß des Köpfungsalters** auf die Zielvariable "Standfestigkeit" (Zeilen 4-7), so erscheinen geköpfte Bestände der II. Altersklasse weniger gefährdet als ältere Bestände.

Ab der III. Altersklasse ist der Wert für  $\exp(w_{2(k)}) > 1$ , d.h. diese Bestände neigen eher dazu, vom Sturm geworfen zu werden.

Die Analyse des **Einflusses der Standortgrundform** ergibt folgendes Ergebnis (Zeilen 8-10):

auf Standortgrundformen  $\leq$ VII verringert sich der Wert des Quotienten um den Faktor 0,3. Aufstockende Bestände werden entsprechend weniger geworfen.

Für Bestände auf Standorten der Grundformen VIII und IX/X zeigen die Werte aus Tabelle 5 (1,28 bzw. 2,63) die entgegengesetzte Tendenz.

Als weiterer Einflußfaktor wirken schließlich noch **Alter und Köpfung zusammen** (Zeilen 11-18). Junge geköpfte Bestände scheinen leichter geworfen zu werden als andere. Auch hier kann das unerwartete Verhalten möglicherweise dadurch erklärt werden, daß gerade junge Bestände nur dann entwipfelt werden, wenn das vorhandene Risiko als besonders groß angenommen wird. Diese Bestände neigen wohl aufgrund der besonderen Risikolage trotz Köpfung stärker zum Umfallen.

Bisher wurden 256 Köpfungsbestände aus den in Kap. 3.1 vorgestellten Forstämtern mit 600 ungeköpften Beständen des Forstamts Kirchberg verglichen. Auf die sich daraus ergebenden Probleme wurde im gleichen Kapitel bereits hingewiesen.

Aus diesen Gründen soll im folgenden überprüft werden, ob sich die vorgenannten Ergebnisse noch bestätigen, wenn von der gleichen regionalen Grundgesamtheit der Daten für geköpfte und ungeköpfte Bestände ausgegangen wird. Das Datenkollektiv wird zu diesem Zweck auf geköpfte und ungeköpfte Bestände des Forstamts Kirchberg beschränkt.

Entsprechend Tabelle 4 wird eine Kontingenztabelle der auszuwertenden Daten für das Forstamt Kirchberg erstellt :

**Tab. 6:** Kontingenztabelle der Aufnahmedaten aus dem Forstamt Kirchberg  
*Contingency table of all investigated stands in the forest district of Kirchberg*

a) Standfestigkeit : geworfen Wipfelköpfung : geköpft			Altersklasse			
	$n_{k1}$	II	III	IV	V	
Standorts-	≤VII	2	4	1	0	
grund-	VIII	6	2	1	0	
form	IX/X	5	3	2	0	
b) Standfestigkeit : geworfen Wipfelköpfung : nicht geköpft			Altersklasse			
	$n_{k1}$	II	III	IV	V	
Standorts-	≤VII	1	5	13	9	
grund-	VIII	3	36	46	31	
form	IX/X	11	35	25	12	
c) Standfestigkeit : nicht geworfen Wipfelköpfung : geköpft			Altersklasse			
	$n_{k1}$	II	III	IV	V	
Standorts-	≤VII	5	3	0	0	
grund-	VIII	6	2	0	0	
form	IX/X	4	0	0	0	
d) Standfestigkeit : nicht geworfen Wipfelköpfung : nicht geköpft			Altersklasse			
	$n_{k1}$	II	III	IV	V	
Standorts-	≤VII	53	22	25	30	
grund-	VIII	47	24	19	18	
form	IX/X	22	13	4	4	

Folgendes Logit-Modell wurde selektiert :

$$\ln \frac{M_{1 j k l}}{M_{2 j k l}} = W + W_1(j) + W_2(k) + W_3(l)$$

für  $j = 1, 2$  ;  $k = 1, 2, 3, 4$  ;  $l = 1, 2, 3$ .

Das Modell unterscheidet sich von dem für alle Forstämter aufgestellten lediglich durch die Eliminierung des Parameters  $W_{12}(jk)$  für die Mehrfachwechselwirkung zwischen Köpfung  $j$  und Alter  $k$ .

**Tab. 7:** Berechnete Modellparameter für die Bestände aus dem Forstamt Kirchberg  
*Model parameters calculated for all stands in the forest district of Kirchberg*

Zeile	Parameter $w_0$	Wert	$\exp(w_0)$
1	$w$	0,5252	1,69
2	$w_1(1)$	0,8526	2,35
3	$w_1(2)$	-0,8526	0,43
4	$w_2(II)$	-1,8772	0,15
5	$w_2(III)$	0,3070	1,36
6	$w_2(IV)$	1,0236	2,78
7	$w_2(V)$	0,5466	1,73
8	$w_3(VII)$	-1,3608	0,26
9	$w_3(VIII)$	0,2234	1,25
10	$w_3(IX/X)$	1,1374	3,12

Wie Tabelle 7 zeigt, entsprechen die Tendenzen der restlichen Parameter denen des für alle Forstämter selektierten Modells.

#### 4.3 Überlebensdauer geköpfter Bestände

Eine Wipfelköpfung muß betriebswirtschaftlich als zweckmäßig angesehen werden, wenn der Sturmwurf mit Hilfe der Köpfung so lange hinausgezögert werden kann, daß der Bestandeswertzuwachs auf der geschützten Fläche die Kosten der Köpfung übersteigt. Der hierzu benötigte Zeitraum variiert in Abhängigkeit von Ertragsklasse, Bestandesalter zum Zeitpunkt der Köpfung und dem Flächenverhältnis zwischen Köpfungszone und nachgelagertem Hauptbestand (vgl. ROEDER und DEINET, im gleichen Heft).

Aus diesem Grund wurde im Rahmen der vorliegenden Untersuchung auch der Frage nachgegangen, wie lange ein geköpfter Bestand in Abhängigkeit vom Bestandesalter zum Zeitpunkt der Köpfung und Standortverhältnissen stehenbleibt.

Wie das vorangegangene Kapitel bereits zeigt, steigt der Anteil der geworfenen Bestände an der Gesamtzahl der Köpfungsbestände mit zunehmender Vernässung des Standorts und zunehmendem Bestandesalter. Daher wurde bei der Untersuchung der Überlebensdauer geköpfter Bestände nach Standortsgrundformen und Bestandesalter differenziert (vgl. Tabellen 8a-8c).

Für alle Standorte gilt gleichermaßen, daß etwa 60 - 80% der Sturmwürfe in Köpfungsbeständen bereits innerhalb von 5 Jahren, z.T. sogar bereits innerhalb von 2 Jahren nach der Maßnahme auftreten.

Es bestätigt sich die Tendenz, daß Bestände auf stärker vernästen Standorten (Standortsgrundform VIII und IX/X) nicht nur insgesamt leichter geworfen werden, sondern auch früher als solche auf nicht oder wenig wasserbeeinflussten Standorten (Standortsgrundform ≤VII).

Ältere Bestände wurden meist etwas stärker und auch rascher nach der Maßnahme von Sturmwürfen betroffen als jüngere Bestände.

Von den ausgewerteten 256 Maßnahmen lagen zum Zeitpunkt der Aufnahme 128 länger als 10 Jahre zurück. Davon wurden 57 (45%) geworfen.

**Tab. 8a:** Lebensdauer geköpfter Bestände auf Grundform ≤VII, getrennt nach Beständen unter und über 50 Jahren  
*Survival time of topped stands on site characteristic ≤ VII, classified according to stand age less than and over 50 years respectively*

Bestände ≤50 Jahre	Köpfung liegt ... Jahre zurück					Summe
	05	10	15	20	>20	
nicht geworfen	12	5	4	8	1	30 (77%) —
geworfen	5			1		5
innerhalb	1					2
von ...		1				1
Jahren						
20				1		1
>20						9 (23%) — —

Bestände >50 Jahre	Köpfung liegt ... Jahre zurück					Summe
	05	10	15	20	>20	
nicht geworfen	13	2	7	9	1	32 (71%) —
geworfen	4	1	3			8
innerhalb	1					1
von ...				1		1
Jahren						
20				3		3
>20						13 (29%) — —

**Alle Altersklassen**

geworfen : 22  
nicht geworfen : 62  
---  
insgesamt 84

**Tab. 8b:** Lebensdauer geköpfter Bestände auf Grundform VIII, getrennt nach Beständen unter und über 50 Jahren  
*Survival time of topped stands on site characteristic VIII, classified according to stand age less than and over 50 years*

Bestände $\leq 50$ Jahre	Köpfung liegt ... Jahre zurück					Summe
	05	10	15	20	>20	
nicht geworfen	7	6	1	1	1	16 (47%)
geworfen	5	2	1			8
innerhalb	5	3				3
von ...	7	2				2
Jahren	10					
15			1	1		2
20					2	2
>20					1	1
						18 (53%)

Bestände >50 Jahre	Köpfung liegt ... Jahre zurück					Summe
	05	10	15	20	>20	
nicht geworfen	6	5	1	1	1	14 (48%)
geworfen	6	2			1	9
innerhalb	5	1				2
von ...	7				1	1
Jahren	10					
15				2		2
20						
>20					1	1
						15 (52%)

Alle Altersklassen

geworfen : 33  
nicht geworfen : 30  
---  
insgesamt 63

**Tab. 8c:** Lebensdauer der geköpften Bestände auf Grundform IX/X,  
 getrennt nach Beständen unter und über 50 Jahren  
*Survival time of topped stands on site characteristic IX/X,  
 classified according to stand age less than and over 50 years*

Bestände $\leq 50$ Jahre		Köpfung liegt ... Jahre zurück					Summe
		05	10	15	20	>20	
nicht geworfen		14	7	1	1		23 (40%)
geworfen	2	16	3				19
innerhalb	5	6	3				9
von ...	7		1				1
Jahren	10		1				1
	15				1		1
	20				2	1	3
	>20						
							34 (60%)

Bestände >50 Jahre		Köpfung liegt ... Jahre zurück					Summe
		05	10	15	20	>20	
nicht geworfen		8	4	2	1	1	16 (30%)
geworfen	2	24	1		2		27
innerhalb	5		3				3
von ...	7		2				2
Jahren	10		1				1
	15			1	3		4
	20						
	>20						
							37 (70%)

Alle Altersklassen

geworfen : 71  
 nicht geworfen : 39  
 -----  
 insgesamt : 110

#### 4.4 **Ergebnisse der Untersuchungen zum Ausführungsmodus und zu Bestandesparametern der Köpfungsbestände**

Die Untersuchungen zum Ausführungsmodus werden im Anhalt an das in Kap. 2.2 beschriebene, vom Institut für Waldbau-Technik der Universität Göttingen entwickelte Verfahren zur Absicherung angebrochener Fichtenbestände mittels Kronenentwipfelung ausgewertet. Im folgenden werden die Aufnahmedaten mit den Empfehlungen dieses Verfahrens verglichen.

Die **durchschnittliche Länge der geköpften Wipfelstücke** beträgt etwa 50 % der Kronenlänge. Entnahmeanteile von  $\leq 40$  % werden in etwa 20 % der untersuchten Köpfungsbestände festgestellt. Hiervon sind 33 % von Sturmwürfen betroffen, also etwas weniger als der Durchschnitt der Köpfungsbestände<sup>1</sup>.

Entnahmen von mehr als 60 % der Kronenlänge sind in 18 % der untersuchten Bestände festzustellen. Jeder dritte dieser Bestände ist durch Borkenkäfer (*Ips typographus*, *Pityogenes chalcographus*) befallen, allerdings nur vereinzelt mehr als 10 % der geköpften Stämme.

Das maximale Entnahmeprozent beträgt 75 bei einem Bekronungsgrad von 30 %.

Seit 1986 sind trotz vieler Informationen innerhalb der Forstverwaltung noch mehrere Köpfungsmaßnahmen mit einer nur 30-prozentigen Kronenkürzung vorgenommen worden.

Zur **Tiefe der Köpfungszone** liegen in 96 der 256 untersuchten Köpfungsbestände Angaben vor. 18 % der Köpfungszone weisen nicht die erforderliche Tiefe einer Baumlänge auf. Ein Einfluß der un-

---

1. vgl. Kap. 4.1, Tab. 3

zureichenden Köpfungstiefe auf die Sicherungswirkung ist wegen des geringen Datenumfangs nicht statistisch nachweisbar.

In keinem der untersuchten Köpfungsbestände sind Hinweise auf die auf Pseudogley-Standorten empfohlenen **Köpfungen von vorwüchsigen Fichten im Hauptbestand** zu finden.

**Nachköpfungen** gibt es lediglich in 3 (von 256) Beständen. Diese Maßnahmen sind jedoch nur deshalb vorgenommen worden, weil der ursprüngliche Köpfungsrand vom Sturm geschädigt war.

**Zusatzastungen** kommen nur in 6 Fällen (2 %) vor. Die Dunkelziffer kann allerdings höher liegen, da für einen Teil der Bestände eine entsprechende Dokumentation fehlte.

Die vom Waldbau-Technik-Institut der Universität Göttingen empfohlene **Schnittflächenbehandlung** mit Holzteer o.ä. ist nur in zwei Revieren bei 10 Maßnahmen (3 %) durchgeführt worden.

Eine **Vitalitätsdüngung** zur Vorbereitung des Bestandes auf die Köpfung bzw. nach der Maßnahme ist erstmals 1983 und seither in 4 Beständen vorgenommen worden.

Die Köpfungen wurden zu folgenden **Zeitpunkten** durchgeführt:

- 28 % der Köpfungen im Frühling,
- 47 % im Sommer (zumeist im August) und
- 25 % im Herbst (September, Oktober).

Ein Zusammenhang zwischen dem Zeitpunkt der Köpfung im Jahresablauf und eingetretenen Sturmwürfen ist aufgrund der nur geringen Zahl von Ausfällen durch Trocknis und/oder Insekten nicht nachweisbar. Gleiches gilt für einen möglichen **Einfluß der Trockenjahre** 1976, 1978 und 1983 auf die Wirksamkeit der Köpfungsmaßnahmen.

Als **Resumé dieser Einzeluntersuchungen** zu den angewendeten Ausführungsmodi kann festgestellt werden, daß sich keine Einflüsse auf die Bestandesstabilität geköpfter Bestände aufgrund unsachgemäßer Durchführung der Maßnahmen (entnommener Kronenanteil, Tiefe der Köpfungszone, Köpfung vorwüchsiger Fichten auf Pseudogley-Standorten) nachweisen lassen. Allerdings sind diese Spezialuntersuchungen zum Teil wegen ihres geringen Datenumfanges in ihrer Aussagefähigkeit eingeschränkt.

Der geringe Umfang von durchgeführten Nachköpfungen und Zusatzastungen könnte eventuell ein Grund für die relativ geringe Erfolgsquote der Köpfungsmaßnahmen sein<sup>2</sup>.

Dies ist allerdings wenig wahrscheinlich in Anbetracht der Tatsache (vgl. Kap. 4.3), daß 60 - 80 % der gefallen Bestände bereits innerhalb von 5 Jahren nach der Köpfung geworfen waren. Eine fehlende Nachköpfung kann somit in diesen Beständen den Erfolg nicht vermindert haben.

Der **Bestockungsgrad** der untersuchten Köpfungsbestände variiert zwischen 0,9 und 1,1. Lediglich in 10 % der Bestände liegt er unterhalb dieser Werte.

In den Untersuchungsbeständen liegt der **Schlankheitsgrad** (h/d-Wert) nach Angaben des befragten Forstpersonals i.a. zwischen 80 und 100. Werte unter 80 können nur selten festgestellt werden.

Die Wirtschaftlichkeit einer Wipfelköpfung wird maßgeblich vom Flächenverhältnis zwischen Köpfungszone und Hauptbestand bestimmt.

-----

2. vgl. Kap. 4.1, Tab. 3

Aus diesem Grund ist die **Tiefe der geschützten Bestände bzw. Bestandeskomplexe** von großem Interesse. Diese variiert zwischen 40 und 700 Metern. Ohne Extremwerte ergibt sich eine Schwankungsbreite zwischen 80 und 600 Metern, wobei die mittlere Tiefe 220 Meter beträgt.

## 5. DISKUSSION

Die Beurteilung der Wirksamkeit von Gipfelköpfungen wirft grundsätzlich die Frage auf, was als "wirksam" oder "mit Erfolg behandelt" gewertet werden soll.

HÜTTE (1983) wertet Köpfungsbestände ohne Sturmschäden, in denen die Maßnahme vor mehr als sieben Jahren erfolgte, als "mit Erfolg behandelt". Dies impliziert, daß die gleichen Bestände ohne Behandlung innerhalb dieses Zeitraumes geworfen worden wären. Diese Annahme kann jedoch kaum zweifelsfrei belegt werden.

Andererseits ist der Vergleich der Quoten "geworfen/nicht geworfen" zwischen den Kollektiven geköpfter und nicht geköpfter Bestände ebenso problematisch, da die zu köpfenden Bestände in der Praxis nicht nach dem Zufallsprinzip, sondern gezielt nach dem Kriterium "besonders sturmgefährdet" ausgewählt werden. Die Teilkollektive "geköpft" und "nicht geköpft" stammen also aus verschiedenen Grundgesamtheiten. Diese generelle und kaum befriedigend zu lösende Grundproblematik muß bei der Interpretation der Untersuchungsergebnisse berücksichtigt werden.

Die von HÜTTE (1983) ermittelte Quote von 90,9 % unversehrten Beständen bei 186 untersuchten Köpfungsbeständen kann in unserer Untersuchung nicht bestätigt werden. Von 256 beurteilten Maßnahmen weisen zum Aufnahmezeitpunkt nur 51 % der behandelten Bestände keinen sturmbedingten Vorratsverlust von mehr als 25 % auf.

Besonders ausgeprägt sind die Unterschiede beider Untersuchungen bei den deutlich stauwasserbeeinflussten Standorten. Während HÜTTE auf Standorten mit Stauhorizont in weniger als 40 cm Bodentiefe (dies entspricht den Standortgrundformen  $\geq$ VIII) von 21 geköpften Beständen 13 (62%) unversehrt findet<sup>3</sup>, halten nach der vorliegenden Untersuchung auf solchen Standorten nur 40 %<sup>4</sup> der geköpften Bestände dem Windangriff stand.

Eine Erklärung für die abweichenden Ergebnisse kann der geringere Datenumfang der Untersuchung von HÜTTE sein (21 Bestände auf Standortgrundformen  $\geq$ VIII; 173 in der vorliegenden Untersuchung). Denkbar ist aber auch, daß das ungünstigere Ergebnis der vorliegenden Untersuchung auf das außergewöhnlich hohe Schadausmaß des Novembersturmes von 1984 zurückzuführen ist, das in die Untersuchung von HÜTTE aufgrund des Zeitpunktes nicht eingehen konnte. Zur Überprüfung dieser Hypothese wird das Datenmaterial der geköpften Bestände bis einschließlich 1983 gesondert ausgewertet (Tabelle 9).

**Tab. 9:** Standfestigkeit aller wipfelgeköpfter Bestände bis einschließlich 1983 in Abhängigkeit von der Standortgrundform  
*Standresistance of all topped stands until 1983 inclusively, dependent on site characteristics*

Standortsgrundform	nicht geworfen	geworfen	Summe
$\leq$ VII	39 (87 %)	6 (13 %)	45
VIII	28 (64 %)	16 (36 %)	44
IX/X	44 (66 %)	23 (34 %)	67
Summe	111 (71 %)	45 (29 %)	156

3. vgl. Tab. 1 in Kap. 2.1

4. Wert berechnet nach Tab. 3, Kap. 4.1

Über alle Standorte und Altersklassen hinweg ergibt sich eine Erfolgsquote von 71 %. Das Ergebnis ist, wie nicht anders zu erwarten, günstiger als bei Einbeziehung des Novembersturmes aus 1984. Dennoch zeigt sich, daß auf staunassen Standorten auch vor diesem Sturm bereits ein Drittel der geköpften Bestände geworfen wurden. Nach Untersuchungen von GIESEMANN und GRAVENHORST (1988) handelt es sich bei dem Novembersturm 1984 nicht um einen "Jahrhundertsturm", da er in der Spitzenwindgeschwindigkeit und der Staudruckdosis von anderen Sturmereignissen in den letzten Jahrzehnten noch übertroffen wurde. Diese Feststellung beruht allerdings auf Wetterdaten aus einem relativ weitmaschigen Netz von Beobachtungsstationen. WOELFLE (1936) und WAGNER (1923) weisen bereits auf die geringe Aussagekraft von Daten aus Wetterstationen zur Auswertung von Sturmschäden hin. Auch GEIGER (1950) vertritt die Auffassung, daß es entscheidend auf das örtliche Strömungsfeld ankommt.

OEHLER (1967) nimmt einen zeitlichen Abstand für das Auftreten von Orkanen von 30 Jahren an. HÜTTE (1967b) rechnet mit einem Auftreten sturmrelevanter Windstärken alle 5 - 7 Jahre. Das hohe Schadausmaß des Novembersturmes 1984 im Vergleich zu Sturmwurfereignissen in früheren Jahrzehnten ist nach den Erhebungen von GALLUS und HEUPEL (1987) vor allem mit dem Hineinwachsen der Fichtenbestände in ältere, sturmwurfanfälligere Altersklassen und mit dem häufigen Auftreten von Anrißlinien aus schwächeren Stürmen zu Beginn der 80er Jahre zu erklären. Nach Ansicht von GIESEMANN und GRAVENHORST (1988) läßt sich der hohe Sturmholzanfall auch auf das Zusammentreffen langanhaltender Niederschlagsepisoden mit dem Sturmereignis zurückführen. Auch andere Autoren weisen auf diesen Zusammenhang bei Sturmwürfen hin.<sup>5</sup> Dieser Vorgang hat sich offenbar häufiger wiederholt. Daher erscheint es bei der Beurteilung von Wipfelköpfungen nicht gerechtfertigt, solche Sturmereignisse als Ausnahmen zu behandeln oder gar unberücksichtigt zu lassen.

-----  
5. WOELFLE (1936), GEIGER (1950), BOSSHARD (1967), FRASER und GARDINER (1967), WANGLER (1974), ROTTMANN (1986)

Die statistische Auswertung des Datenmaterials unter Einbeziehung nicht geköpfter Bestände zeigt, daß geköpfte Bestände eine höhere Ausfallquote haben als nicht geköpfte Bestände. Dieses Ergebnis wird sicherlich durch die besondere Gefährdungssituation der zur Wipfelköpfung ausgewählten Bestände beeinflusst. Dies verdeutlicht auch die stark unterschiedliche Verteilung geköpfter und nicht geköpfter Bestände auf die verschiedenen Standortsgrundformen. Das Kollektiv der wipfelgeköpften Bestände umfaßt weit mehr extrem stauwasserbeeinflusste Standorte als das der nicht wipfelgeköpften. Durch die Wipfelköpfung gelingt es jedoch nicht, die besondere Gefährdungssituation dieser Bestände auf das "normale" Maß zu reduzieren. Da als Vergleichskollektiv (unbehandelte Bestände) nur Bestände aus dem besonders sturmbetroffenen Forstamt Kirchberg verwendet werden, ist das Ergebnis eher konservativ. Im Forstamt Kirchberg dürfte das Sturmwurfrisiko auch für unbehandelte Bestände durch die Gemengelage vernäster und nicht vernäster Standorte und die extrem häufigen Sturmwurfanrisse im Vergleich zu den anderen in diese Untersuchung einbezogenen Forstämter besonders hoch sein. Daher liegt der Quotient "geworfen/nicht geworfen" bereits im Vergleichskollektiv mit 1,69 verhältnismäßig hoch.

Den entscheidenden Einfluß auf die Sturmfestigkeit der Bestände und auf die Wirksamkeit der Wipfelköpfungen übt die Standortsgrundform aus.

Auf den wenig oder nicht stauwasserbeeinflussten Standorten (Standortsgrundform  $\leq$ VII) sind von den ungeköpften Beständen weniger als ein Fünftel, von den geköpften Beständen ein Viertel vom Sturm geworfen.

Auf den mäßig stauwasserbeeinflussten Standorten (Standortsgrundform VIII) sind es bei beiden Kollektiven bereits die Hälfte, auf den stark stauwasserbeeinflussten Standorten (Standortsgrundform IX/X) zwei Drittel der in die Erhebung einbezogenen Bestände.

Auch HÜTTE (1983) stellt fest, daß die Wirksamkeit der Wipfelköpfung vom Standort abhängt. Nach seinen Untersuchungen werden geköpfte Bestände nur bei hoch anstehendem Stauhizont geworfen. Werden die von HÜTTE (1983) erhobenen Daten (vgl. Tabelle 1) nach dem beschriebenen statistischen Verfahren ausgewertet, so ergibt sich folgendes Logit-Modell aus der Stichprobe:

$$\ln \frac{m_{1jk1}}{m_{2jk1}} = w + w_1(j) + w_2(k), \quad j = 1, 2, 3; \quad k = 1, 2.$$

Statistische Daten:

Likelihood-Quotenstatistik  $G^2=1,34$  ,  $FG=2$  ,  $P=0,512$   
 Chi-Quadratstatistik  $X^2=1,26$  ,  $FG=2$  ,  $P=0,533$

**Tab. 10:** Berechnete Modellparameter für die von HÜTTE (1983, S. 346, Tab. 1) erhobenen Daten  
*Model parameters calculated from data in HÜTTE (1983)*

Zeile	Parameter $w_0$	Wert	exp ( $w_0$ )
1	w	1,871	6,50
2	w <sub>1</sub> (1)	-1,075	0,34
3	w <sub>1</sub> (2)	1,075	2,93
4	w <sub>3</sub> (sVII)	1,047	2,85
5	w <sub>3</sub> (VIII)	0,250	1,28
6	w <sub>3</sub> (IX/X)	-1,297	0,27

Hieraus ergibt sich, daß die Erfolgsaussichten einer Wipfelköpfung auf Standorten mit hoch anstehendem Stauhohizont geringer und bei nicht stauwasserbeeinflußten Standorten höher sind.

Die Untersuchung von HÜTTE (1983) zeigt weiterhin, daß Wipfelköpfungen in Beständen mit einem Bekronungsgrad von mehr als 30 % einen größeren Behandlungserfolg erwarten lassen als Bestände mit kleineren Kronen. Gemeinsame Wechselwirkungen von Kronenlänge und Standortgrundformen auf das Verhältnis geworfener zu nicht geworfenen Bestände sind dagegen nicht festzustellen.

Aus den Daten der vorliegenden Untersuchung kann ein Einfluß der Kronenlänge auf die Wirksamkeit der Wipfelköpfung hingegen nicht festgestellt werden. Eine Erklärung hierfür kann nicht gegeben werden.

Die Einflüsse von unsachgemäßer oder unvollständiger Ausführung der Köpfungsmaßnahmen auf deren Wirksamkeit können aus der vorliegenden Arbeit nicht abgeschätzt werden. Einerseits sind Zusatzastungen und Nachköpfungen nahezu immer unterblieben; somit kann dem Kollektiv "nicht sachgerechte Ausführung" kein adäquates Kollektiv "sachgerechte Köpfung" gegenübergestellt werden. Andererseits werden fehlerhafte Ausführungen bezüglich des entnommenen Kronenanteils und der Tiefe der Köpfungszone in der Erhebung nur verhältnismäßig selten festgestellt.

Wie in Kap. 4.3 dargestellt, sind insgesamt mehr als zwei Drittel der Sturmwürfe in geköpften Beständen bereits innerhalb von 5 Jahren nach der Maßnahme aufgetreten.

Ein die Köpfungskosten deckender Wertzuwachs des Bestandes dürfte innerhalb dieser Zeitspanne nur in sehr guten Ertragsklassen und bei günstigem Flächenverhältnis von Köpfungszone zum Hauptbestand gegeben sein. Außerdem muß dazu von der Prämisse ausgegangen werden, daß der gleiche Bestand ohne Köpfung sofort ganzflächig geworfen worden wäre (vgl. ROEDER u. DEINET, im gleichen Heft).

Die Wipfelköpfungen zeigen nach den vorliegenden Untersuchungen, vor allem auf staunassen Standorten, einen erheblich geringeren Wirkungsgrad als bislang in der Literatur angenommen (STOCK (1926), HÜTTE (1964, 1967b, 1983), MASCHER (1965), VON JENA (1967), OEHLER (1969)).

Nur jede zweite, auf extrem vernäßten Standorten sogar nur jede dritte Maßnahme überdauerte die Stürme. Dieses Ergebnis der Untersuchung spricht nicht generell gegen Wipfelköpfungen auf Pseudogleystandorten. Der Wert des zu sichernden Objektes kann u.U. so groß sein, daß eine Köpfung auch bei geringen Erfolgsaussichten sinnvoll erscheinen mag. Dies dürfte z.B. dann der Fall sein, wenn der zu sichernden Köpfungszone ein sehr großer, nicht hiebsreifer Fichtenkomplex nachgelagert ist.

Die Ergebnisse unterstreichen allerdings fraglos die Forderung, ausgesprochene Naßstellen von vornherein vom Anbau mit Fichte auszusparen.

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Untersuchung beschäftigt sich mit der Wirksamkeit von Wipfelköpfungen sowie deren Dauer und Abhängigkeit von Standort, Bestandesalter, Ausführungsmodus und anderen Einflußgrößen waldbautechnischer Art.

Insgesamt wurden 256 Köpfungsbestände aus dem nördlichen Rheinland-Pfalz untersucht und mit 600 nicht behandelten Beständen aus dem Forstamt Kirchberg/Hunsrück verglichen.

Die Auswertung erfolgte mit Hilfe des Quoten-Vergleichsverfahrens ("geworfen/nicht geworfen") und eines an der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz angepaßten statistischen Analyseverfahrens für diskrete Daten (Logit-Modelle).

Die Auswertung durch Quotenvergleich bestätigt Literaturberichte darüber, daß jüngere Köpfungsbestände, besonders auf wenig stauwasserbeeinflußten Standorten, seltener von Sturmschäden betroffen sind als ältere.

Die Auswertung bestätigte ebenfalls früher beschriebene Beobachtungen zum Stauwassereinfluß auf die Wirksamkeit von Wipfelköpfungsmaßnahmen. Auf nicht und wenig stauwasserbeeinflußten Standorten überdauerten 73 % der geköpften Bestände. Mit zunehmendem Stauwassereinfluß sank die Quote auf 35 %.

Die statistische Auswertung zeigte neben den Einzeleinflüssen der Parameter "Köpfung", "Altersklasse" und "Standortsgrundform" eine zusätzliche Mehrfachwechselwirkung zwischen Köpfung und Altersklasse einerseits und dem Erfolg der Köpfung andererseits. Eine stabilisierende Wirkung der Köpfungsmaßnahmen konnte wie beim Quotenvergleich nur für wenig stauwasserbeeinflußte Standorte festgestellt werden. Dies könnte auf die in der Praxis gezielte Auswahl besonders gefährdeter Bestände für die Köpfung zurückzuführen sein.

Die statistische Auswertung wirft die Frage auf, ob Wipfelköpfungen überhaupt eine stabilisierende Wirkung ausüben, da sie nach den vorliegenden Ergebnissen nicht zur Verringerung des Sturmschadensrisikos unter das "normale" Ausmaß beitragen.

Um den Einfluß unterschiedlicher regionaler Herkunft der Daten auszuschließen, wurde eine zweite Analyse ausschließlich mit Daten aus dem Forstamt Kirchberg durchgeführt. Sie erbrachte jedoch keine abweichenden Ergebnisse.

Untersuchungen zur Wirkungsdauer von Wipfelköpfungen ergaben, daß 60 bis 80 Prozent der geköpften Bestände innerhalb von 5 Jahren geworfen wurden. Die Wirkungsdauer der Wipfelköpfung nahm mit zunehmendem Stauwassereinfluß ab. Die gleiche Tendenz zeigte sich auch bei zunehmendem Bestandesalter zum Zeitpunkt der Köpfung.

Die Analyse der Ausführungsmodi ergab, daß nur in wenigen Beständen von den Empfehlungen des Instituts für Waldbau-Technik der Universität Göttingen zur Ausführungstechnik der Wipfelköpfung abgewichen wurde. Allerdings unterblieben Nachköpfungen und Vorwuchsköpfungen auf labilen Standorten fast immer (98%). Ob diese unterlassenen Nachköpfungen einen Einfluß auf die Wirksamkeit der Wipfelköpfung insgesamt hatten, konnte aufgrund des geringen Datenumfanges nicht abgesichert werden, ist jedoch aufgrund des bald nach der Köpfung eingetretenen Sturmwurfs wenig wahrscheinlich.

Anhand der Tiefe bzw. dem Flächenverhältnis zwischen Köpfungszone und Hauptbestand lassen sich Wirtschaftlichkeitsberechnungen für die Maßnahmen durchführen. Für die untersuchten 256 Köpfungsbestände lag die mittlere Tiefe bei 220 Metern.

Insgesamt konnten die in der Sturmschadensliteratur zu findenden vorwiegend positiven Urteile bezüglich der Wirksamkeit von Wipfelköpfungen nicht bzw. nicht in dem beschriebenen Ausmaß bestätigt werden.

Allerdings kann eine Entscheidung über die Durchführung einer Wipfelköpfungsmaßnahme nur für einen konkreten Bestand getroffen werden. Das (standörtlich und bestandesabhängig) stark variierende Risiko ist generell in die Kosten-Nutzen-Analyse und in den Entscheidungsprozeß einzubeziehen.

## 7. SUMMARY

Title of the paper:

Empirical investigations on the effectiveness of crown topping to reduce the storm risk of spruce stands on pseudogley sites.

Investigations have been carried out to analyse the effectiveness of crown topping and its relationship to site, stand age, performance mode and other silvicultural influences.

Data on 256 topped stands have been gathered within the region of northern Rheinland-Pfalz and are compared with 600 untreated stands from the forest district of Kirchberg/Hunsrück.

Data were analysed by comparing the ratio of damaged and undamaged stands. Special nonparametric statistical procedures (so-called LOGIT-model) for discrete data were used.

The findings of the ratio comparison showed in accordance with literature, that younger stands, predominantly on sites with no stagnant moisture are less susceptible to storms than older ones. Data analysis also confirmed former observations on the significant influence of stagnant moisture on the effectiveness of crown topping. On sites with no or nearly no stagnant moisture 73 % of the topped stands have survived. This ratio decreased to 35 % with increasing influence of stagnant moisture.

Besides the effects of the variables "treatment", "stand age" and "site characteristic" statistical analysis revealed also additional mutual influences between crown topping and stand age on one hand and the success of the treatment on the other. Crown topping showed stabilizing effects only on sites with little influence of stagnant moisture. One probable explanation for this surprising finding can be, that in practice only heavily endangered stands are selected for crown topping.

Results indicate that crown topping has not been able to rise survival rate on an average level.

Therefore statistical analysis poses also the question whether crown topping in any case is suitable for stand stabilisation.

Data exclusively from the forest district of Kirchberg were analysed to eliminate the influence of different regional data sources.

The results, however, were in accordance with the previous ones. Also the survival time of topped stands was covered by the investigation:

60 to 80 percent of the topped stands was damaged by storm within 5 years after crown topping. Survivaltime decreased with increasing stagnant moisture and with increasing stand age, too.

The performance mode deviated only in few cases from the standard technique recommended by the Institute of Silviculture, University of Göttingen. Only follow up crown topping and topping of predominant trees were very often neglected on unstable sites.

Nevertheless it is rather unprobable that missing follow up crown topping were significantly responsible for the little effect of stand treatment because of the short survivaltime already mentioned.

Area ratio between crown topping zone and protected stand area is very essential for cost-benefit relations. Mean protected depth of the 256 investigated stands was calculated as 220 m.

In literature statements on the effectiveness of crown topping are prevailingly positive. In conclusion our investigation can not confirm these observations to such an extent. However, decisions on crown topping have to take into account the special situation of a single stand and must be based on a sound analysis of risk and cost-benefit.

## 8. LITERATURVERZEICHNIS

### Übersicht der im Literaturverzeichnis verwendeten Abkürzungen:

AFZ	Allgemeine Forstzeitschrift, München
AFZ, Wien	Allgemeine Forstzeitung, Wien
AFJZ	Allgemeine Forst und Jagdzeitung
FA	Forstarchiv
FoHo	Forst- und Holzwirt
FTI	Forsttechnische Informationen
FWC	Forstwissenschaftliches Centralblatt
HZBl.	Holz Zentralblatt, Stuttgart
SZFF	Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen

BARGMANN, B. (1904): Die Verteidigung und Sicherung der Wälder gegen die Angriffe und Gewalt der Stürme, unter besonderer Berücksichtigung der örtlichen Windablenkung.  
AFJZ, S. 81-89, 121-139, 161-177, 201-216, 241-257

BEYREUTHER (1958): Wipfelköpfung als Windschutzmaßnahme.  
AFZ 13: S. 201

BINDSEIL, W. (1958): Sicherung sturmgefährdeter Waldbestände.  
HZBl. 84: S. 1461-1462

BOSSHARD, W. (1967): Erhebungen über die Schäden der Winterstürme 1967. SZFF, S. 806-820

EIFERT, R. (1903): Forstliche Sturmbeobachtungen im Mittelgebirge.  
AFJZ 79: S. 323-341, 369-381, 413-444

EULEFELD (1921): Sicherungen gegen Sturmschäden. Silva (7): S. 38

FRASER, A. u. GARDINER, J. (1967): Rooting and stability in Sitka-Spruce. For. Comm. Bull. No. 40

FRITZSCHE, K. (1933): Sturmgefahr und Anpassung: Sonderabdruck aus dem Tharandter Forstlichen Jahrbuch 1933.  
Berlin: Verlag P. Parey, 94 S.

FRÖMSDORF, G. (1967): Über die Verminderung von Sturmschäden in Fichtenbeständen auf wechselfeuchten Stauwasserböden.  
AFZ 22, S. 735-738

GALLUS, M. u. HEUPEL, M. (1987): Feststellung von Beziehungen zwischen Sturmschäden, Standort und Bestandesstruktur bei der Baumart Fichte im Rahmen des Projektes "SIMS", unveröffentlichte Untersuchung der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Trippstadt

- GEIGER, R. (1950): Die meteorologischen Voraussetzungen der Sturmgefährdung. FWC, S. 71-80
- GEHRHARDT (1932): Verminderung der Sturmgefahr bei Fichte durch Kronenverkleinerung. Deutsche Forst-Zeitung 1932, S. 473-475
- GIESEMANN, J. u. GRAVENHORST, G. (1988): Untersuchungen der Beziehungen zwischen Sturmschäden und außergewöhnlichen meteorologischen Ereignissen im "VORDEREN HUNSRÜCK". Unveröffentlichter Bericht
- HESS-BECK (1930): Lehr- und Handbuch des Forstschatzes II. 5. Aufl., o.O.: Neumann-Neudamm-Verlag, 614 S.
- HORNDASCH, M. (1971): Grundsätze und Möglichkeiten der Stabilisierung windwurfgefährdeter Standorte. AFZ 25, S. 304-306
- HORNDASCH, M. (1987): Stabilisierung der Fichtenbestände auf windwurfgefährdeten Standorten. Augsburg: Selbstverlag
- HÜTTE, P. (1964a): Untersuchungen über den Einfluß des Geländerelevs auf Richtung, Geschwindigkeit und Struktur des Sturmes im Hinblick auf die Sturmgefährdung der Fichte. Dissertation Göttingen
- HÜTTE, P. (1964b): Sturmschutz in Fichtenbeständen. AFZ 19: S. 356-358
- HÜTTE, P. (1967a): Möglichkeiten und Grenzen der Absicherung angebrochener Fichtenbestandesränder. FTI, S. 87-93
- HÜTTE, P. (1967b): Die standörtlichen Voraussetzungen der Sturmschäden. FWC, S. 276-295
- HÜTTE, P. (1969): Sturmgefahr und Traufschutz. AFZ 24, S. 243-246
- HÜTTE, P. (1971): Zu: Grundsätze und Möglichkeiten der Stabilisierung windwurfgefährdeter Standorte. AFZ 26, S. 758
- HÜTTE, P. (1983): Die Absicherung angebrochener Fichtenbestandesränder gegen Sturmschäden in Abhängigkeit von Durchforstungsstärke und Standort. FWC, S. 343-349
- HÜTTE, P. (1986): Möglichkeiten zur Reduzierung der Sturmschäden in Nadelbaumbeständen. AFZ 41: S. 1204-1206
- INSTITUT FÜR WALDBAUTECHNIK DER UNIVERSITÄT GÖTTINGEN (1969): Merkblatt über die Absicherung angebrochener Fichtenbestände mittels Kronenentwipfelung. Waldarbeit Straßenhaus 20 (9): S. 237
- JENA, K.-E. v. (1967): Erfahrungen mit Wipfelköpfung von Fichten in einem Privatrevier des Westharzes. FTI, S. 94-96 u. (12) S. 104

- JUNGHANS, W. (1957): Technische Windschutzanlagen.  
AFZ 12, S. 432-434
- MASCHER, R. (1965): Die Sicherung sturmgeschädigter Fichten-  
nachwuchsbestände durch Wipfelköpfung. FoHo 20: S. 284
- MITSCHERLICH, G. (1973): Wald und Wind. AFJZ 144: S. 74-81
- OEHLER, H. (1967): Die Sturmgefährdung der Fichte.  
AFZ 22: S. 312-313
- OEHLER, H. (1969): Künftige Behandlung durch den Sturm aufgeris-  
sener Bestände und Wiederaufforstung der Sturmflächen  
AFZ 24: S. 567-568
- REUß, H. (1889): Über die Bewahrung von Windrissen in wert-  
volleren Nadelholz-Mittelbeständen.  
Centralblatt für das gesamte Forstwesen (11): S. 445-453
- ROßMÄßLER (1920): Die Gefährdung unserer Fichtenbestände.  
Silva (13): S. 65-68
- ROßMÄßLER (1928): Vorstellung des Verfahrens der einseitigen  
Aufastung in Fichtenbeständen. Silva (16): S. 121.123
- ROTTMANN, M. (1986): Wind- und Sturmschäden im Wald.  
Frankfurt: J.D. Sauerländer's Verlag
- RÜCKER (1848): Über die Verhinderung von Windbruch und über die  
Betriebsregulierung in großen Gebirgswäldern. AFJZ 19, S.2
- SIEBENBAUM (1958): Praktische Erfahrungen mit der mechanischen  
Verankerung von Sturmkränzen. AFZ S. 201-203
- SPEIDEL, G. (1972): Planung im Forstbetrieb  
Hamburg u. Berlin: Verlag P. Parey
- STACH, W. (1925): Technische Sturmsicherung.  
Silva, S. 369-373
- STACH, W. (1926): Zur technischen Sturmsicherung.  
Silva, S. 326-327
- STOCK (1926): Technische Sturmsicherung. Silva, S. 137-141
- VOLK, K. (1968): Über die Sturmschäden in Südbaden.  
AFJZ 139: S. 45-56
- WANGLER, F. (1975): Die Sturmgefährdung der Wälder in Südwest-  
deutschland, eine waldbauliche Auswertung der Sturmkatastrophe  
von 1967. Dissertation Freiburg
- WINTERFELD, K. (1967): Erfahrungen mit Fichten-Wipfelköpfungen im  
Forstamt Westerhof. FTI: S. 96

WOELFLE, M. (1936): Sturmschäden im Wald, I. Mitteilung  
FWC, S. 605-617

WOELFLE, M. (1937): Sturmschäden im Wald, II. Mitteilung.  
FWC, S. 77-92, III. Mitteilung. FWC, S. 565-588

YELIN (1886): Über nützliche Astungen. FWC, S. 512-522

ZENTGRAF, E. (1938): Technische Sturmsicherung von Fichten-  
beständen. AFJZ 109, S. 358-360

**BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE UNTERSUCHUNGEN ZUR  
WIPFELKÖPFUNG VON FICHTE (*Picea abies* (L.) KARST)**

**von**

**A. Roeder und A. Deinet**

## **INHALTSVERZEICHNIS**

### **1. EINLEITUNG**

### **2. KRITERIEN ZUR BEURTEILUNG DER WIRTSCHAFTLICHKEIT VON WIPFELKÖPFUNGEN**

#### 2.1 Standörtliche Bedingungen

#### 2.2 Bestandesbezogene Voraussetzungen

#### 2.3 Sonstige Voraussetzungen

#### 2.4 Kosten der Wipfelköpfung

2.4.1 Kosten für die erstmalige Durchführung sowie für Nachköpfungen

2.4.2 Verluste durch geköpfte Wipfelstücke und stagnierende Höhenentwicklung

2.4.3 Verluste durch rotfaule Zopfstücke

2.4.4 Zuwachsverluste in der Köpfungszone

2.4.5 Verluste durch sonstige Schäden

#### 2.5 Leistungen der Wipfelköpfung

### **3. DAS ENTSCHEIDUNGSMODELL**

#### 3.1 Herleitung des Entscheidungsmodells

#### 3.2 Bewertungsgrundlagen und -methoden

3.2.1 Ermittlung der Erwartungswerte und Abtriebswerte

3.2.2 Bewertung der Köpfungskosten

3.2.3 Bewertung der Kosten durch geköpfte Wipfelstücke und durch Faulholz am Zopf

3.2.4 Bewertung der Zuwachsverluste

### **4. ERGEBNISSE UND ANWENDUNGSBEISPIELE**

#### 4.1 Die Wertentwicklung der Modellbestände

#### 4.2 Die Kosten der Wipfelköpfung

#### 4.3 Entscheidungsdiagramme und Erwartungswerte

4.3.1 Entscheidungsdiagramme

4.3.2 Erwartungswerte des Nettonutzens

**5. DISKUSSION**

**6. ZUSAMMENFASSUNG**

**7. SUMMARY**

**8. LITERATURVERZEICHNIS**

**9. ANHANG**

## **1. EINLEITUNG**

Die Wipfelköpfung ist eine in der Praxis übliche Maßnahme zur vorsorgenden Sicherung gefährdeter oder zur Stabilisierung angebrochener Fichtenbestände. Die zahlreiche Literatur zur Wipfelköpfung befaßt sich vor allem mit der Methode und der Wirkungsweise dieser waldbaulichen Maßnahme. Betriebswirtschaftliche Untersuchungen sind in diesem Rahmen kaum durchgeführt worden.

Unter der Maxime wirtschaftlichen Handelns ist es erforderlich, die mit der Wipfelköpfung verbundenen Vor- und Nachteile zu quantifizieren, gegeneinander abzuwägen und das Ergebnis dieser Überlegungen in den Entscheidungsprozess einfließen zu lassen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, durch eine eingehende Analyse der verfügbaren Literatur die Grundlagen zur wirtschaftlichen Beurteilung der Köpfungswirkungen zusammenzutragen. Daraus sind dann betriebswirtschaftliche Entscheidungshilfen abzuleiten und anhand von vereinfachenden Modellkalkulationen für die Praxis handhabbar zu machen.

## **2. KRITERIEN ZUR BEURTEILUNG DER WIRTSCHAFTLICHKEIT VON WIPFELKÖPFUNGEN**

Jede wirtschaftliche Entscheidung wird anhand von klar definierten Kriterien prüfen müssen, inwieweit die Rahmenbedingungen und Erfolgsgrößen eine vorgesehene betriebliche Maßnahme vorteilhaft erscheinen lassen. Diese Anforderungen gelten auch für eine Wipfelköpfung. Die Entscheidungskriterien bilden daher wesentliche Grundlagen des Entscheidungsmodells zur Wipfelköpfung, das in Kapitel 3 vorgestellt wird.

### **2.1 Standörtliche Bedingungen**

Die Wirksamkeit der Wipfelköpfung wird ganz entscheidend vom Grund- oder Stauwassereinfluß des Standorts beeinflusst (z.B. HÜTTE 1983). In Abhängigkeit von den jeweiligen standörtlichen Gege-

benheiten muß daher die Verfahrenstechnik bei der Durchführung von Wipfelköpfungen leicht variiert oder flankierende Maßnahmen getroffen werden. Die Verfahrenstechnik zur Absicherung angebrochener Fichtenbestände durch die Entwipfelung der Kronen ist in einem Merkblatt des Instituts für Waldbautechnik, Universität Göttingen, beschrieben.

Für Standorte mit hoch anstehendem Grund- oder Stauwasser empfiehlt HÜTTE (1967a), nicht nur den Bestandesrand zu köpfen, sondern ebenfalls die im Hauptbestand vorwüchsigen Fichten. Gleichzeitig bewährte sich nach den Erfahrungen des gleichen Autors, anfallendes Oberflächenwasser an vernähten Stellen in der Köpfungszone durch einen Graben zu entwässern.

Naßgallen stellen häufige Angriffspunkte für Sturmwürfe im Bestand dar. Daher kann hier die Wipfelköpfung als prophylaktische Sturmschutzmaßnahme eingesetzt werden.

Innerhalb der Fichtenbetriebsklasse gelten nach der rheinland-pfälzischen Kartieranweisung die Standortsgrundformen VIII-IX/X als besonders gefährdet; es handelt sich hier um Standorte mit Pseudovergleyung im Unterboden höher als 65 cm unter der Mineralbodenoberfläche.

Untersuchungen der Wurfhäufigkeit in Abhängigkeit von Standort und Kronenlänge durch HÜTTE (1983) ergaben, daß bei Kronenlängen von 20 % - dies entspricht etwa der Ausgangslage in schwach niederdurchforsteten Beständen - und gleichzeitig hochanstehendem Grund- oder Stauwasser ein Erfolg der Wipfelköpfung nicht gewährleistet ist.

Der Standort wirkt nicht nur über die Verankerung im Boden auf die Standfestigkeit der Fichten. Vom Wasser- und Nährstoffangebot hängt auch entscheidend die Vitalität und das Regenerationsvermögen der geköpften Bäume ab.

## 2.2 Bestandesbezogene Voraussetzungen

Da die Wipfelköpfung erheblich in die grüne Lichtkrone der Fichten eingreift, wird die weitere Entwicklung der geköpften Randzone und die Wirksamkeit der Maßnahme wesentlich von der Vitalität der Bäume bestimmt. Insbesondere das Kriterium **Kronenausprägung** sollte zur Beurteilung der Vitalität im Rahmen der Entscheidung herangezogen werden. Folgeschäden physiologischer und letztlich auch waldbaulicher Art sind entscheidend vom Verhältnis zwischen relativer Kronenlänge und dem Köpfungsgrad (= prozentualer Anteil der entnommenen Krone an der gesamten Kronenlänge) abhängig. Aus der Literatur (HÜTTE 1983; MASCHER 1965; OEHLER 1969) ergeben sich Mindestkronenlängen von 20, besser 30, Prozent der Baumhöhe, um den Erfolg der Wipfelköpfung zu gewährleisten.

Eine ausreichende **Tiefe der Köpfungszone** von etwa einer Baumhöhe ist ebenfalls zur erfolgreichen Anwendung der Wipfelköpfung notwendig (HOUTERMANS 1958, HÜTTE 1964a, b, OEHLER 1967, von JENA 1967, WINTERFELD 1967). Dies bedeutet eine mit zunehmendem Bestandesalter und besserer Ertragsklasse größere Fläche der Köpfungszone.

Der wirtschaftliche Erfolg einer Wipfelköpfung steigt mit der **Größe der geschützten Bestandesfläche**. Die entstehenden Kosten verteilen sich auf diese Fläche, da auch die Leistungen der Wipfelköpfung in Form der vermiedenen Sturmschäden die gesamte Bestandesfläche betreffen. Dementsprechend sinken die anteiligen Kosten je Hektar mit der Größe des Bestandes.

Weitere bestandesbezogene, kostenwirksame Voraussetzungen für die Durchführung einer Wipfelköpfung, wie z.B. Entfernung schwacher Bestandesglieder aus der Köpfungszone, Randbegradigung etc., sind ebenfalls zu beachten.

Ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen Bestandesalter und Erfolg der Wipfelköpfung konnte bisher noch nicht gesichert nachgewiesen werden (HÜTTE 1983).

### **2.3 Sonstige Voraussetzungen**

Wie alle Maßnahmen im Forstbetrieb muß auch die Wipfelköpfung vor dem Hintergrund der gesamtbetrieblichen Situation gesehen werden. Daher wird sich die Entscheidung für oder gegen eine Wipfelköpfung nicht nur am gefährdeten Einzelbestand orientieren können, sondern muß sich nach der wirtschaftlichen Gesamtlage des Betriebes richten. Viele Einzelfaktoren wie z.B. Altersklassenverhältnis, waldbauliche Gesamtplanung, räumliche Ordnung und die finanzielle Situation des Betriebes spielen eine zum Teil ausschlaggebende Rolle. Nicht zuletzt fließen auch die persönlichen Erfahrungen und Präferenzen des Entscheidungsträgers in die Risikobeurteilung der Wipfelköpfung und damit in die Entscheidung ein.

### **2.4 Kosten der Wipfelköpfung**

Durch die Wipfelköpfung entstehen im einzelnen folgende Kosten:

- Kosten für die erstmalige Durchführung sowie für die Nachköpfungen
- Verluste durch geköpfte Wipfelstücke und stagnierende Höhenentwicklung
- Verluste durch rotfaule Zopfstücke
- Zuwachsverluste in der Köpfungszone
- Verluste durch sonstige Schäden

In der Literatur werden bevorzugt die mit der Wipfelköpfung verbundenen physiologischen Schäden beschrieben. Betriebswirtschaftliche Bewertungen der mit der Wipfelköpfung verbundenen wirtschaftlichen Verluste wurden bisher nur von KIENE (1970) in beschränktem Umfang durchgeführt. Die Auswertung der Literatur zu verwandten Problembereichen, die sich mit Eingriffen in die grüne Krone infolge von Wipfelbrüchen und Ästungen befassen, lieferte keine weiterführenden Daten, da die beschriebenen Situationen entweder nicht vergleichbar oder die angeführten Daten zu unpräzise waren.

#### 2.4.1 Kosten für die erstmalige Durchführung sowie für Nachköpfungen

Der größte Teil der zur Wipfelköpfung vorhandenen Literatur stammt aus den von Sturmkalimitäten stark beeinflussten 60iger Jahren, als Wipfelköpfungen zur Absicherung offener Bestandesränder in größerem Umfang durchgeführt wurden. Seit dieser Zeit sind keine aktuellen und repräsentativen Kostensätze veröffentlicht worden. Für die Modellkalkulationen der vorliegenden Arbeit müssen sie daher neu ermittelt werden (vergl. Kapitel 3.2.2).

Die Wipfelköpfung wird in der Regel manuell durchgeführt. Nur in seltenen Situationen ist Maschineneinsatz möglich, wie z.B. der Einsatz von Lkw montierten hydraulischen Arbeitskörben im Traufbereich gefährdeter Waldbestände entlang von Waldstraßen.

Grundsätzlich müssen die **Regiearbeit** und der **Unternehmereinsatz** unterschiedlich bewertet werden. Während bei Unternehmereinsatz in der Regel ein Stücksatz vereinbart wird, werden eigene Arbeitskräfte heute aus Sicherheitsgründen meist im Zeitlohn beschäftigt.

Die **Baumhöhe** als resultierendes Kriterium aus **Bestandesalter** und **Bonität** hat entscheidenden Einfluß auf die entstehenden Kosten der Durchführung, da mit zunehmender Bestandeshöhe sowohl Arbeitszeit pro Baum als auch Gefährdungsgrad steigen. Gleichzeitig vergrößern sich die Baumabstände und es können von einem bestiegenen Baum aus immer weniger Nachbarbäume mitgeköpft werden.

Da sich die Baumabstände unter sonst gleichen Bestandesverhältnissen im **Bestockungsgrad** widerspiegeln, wird auch dieser als Kostenfaktor wirksam.

Die Astigkeit eines Bestandes kann in manchen Fällen kostenerhöhend wirken, wenn sie eine Behinderung bei der Besteigung der Bäume darstellt.

Die **Neigung** des Geländes wird von Wipfelköpfen unterschiedlich hinsichtlich ihrer Kostenwirksamkeit beurteilt. Während manche Wipfelköpfer ihren Einfluß auf den Arbeitsfortschritt vernachlässigen, wird von anderen die Auffassung vertreten, daß die Möglichkeit, Nachbarbäume zu köpfen, mit zunehmender Hangneigung geringer wird und daher kostenerhöhend wirkt.

#### **2.4.2 Verluste durch geköpfte Wipfelstücke und stagnierende Höhenentwicklung**

In der verfügbaren Literatur wurden keine Angaben zu Massen- und Wertverlusten gefunden, die durch geköpfte Wipfelstücke entstehen.

KIENE (1970) berechnet Massenverluste durch die Wipfelköpfung, ohne aber genaue Angaben zum Köpfungsgrad bzw. zur Lage der Schnittstelle am Stamm zu machen. Eine andere Untersuchung (VONHOFF 1975) zeigt, daß der Schnittstellendurchmesser in der Mehrzahl der untersuchten Fichten unter der üblichen Aufarbeitungsgrenze für Industrieholz von 8 cm mit Rinde liegt. Es darf daher gefolgert werden, daß wirtschaftliche Schäden nicht oder nur in vernachlässigbarem Umfang entstehen.

Von entscheidender Bedeutung ist dagegen die Tatsache, daß die geköpfte Zone keinen Höhenzuwachs an Stammholz bringt. Die dadurch bedingte Volumen- und Sortimentseinbußen sind zu bewerten.

#### **2.4.3 Verluste durch rotfaule Zopfstücke**

VONHOFF (1975) untersucht im Forstamt Oberkochen auf der Schwäbischen Alb die Eindringtiefe und Eindringgeschwindigkeit von holzzerstörenden Pilzen und identifiziert neun unterschiedliche Fäulniserreger an 28 untersuchten Stämmen.

6 - 8 Jahre nach der Köpfung waren Pilze an 37 untersuchten Fichten durchschnittlich nicht tiefer als einen Meter in das Zopfstück eingedrungen. Nur ein Stamm wies eine Eindringtiefe über 2 m auf. Das Holz war trotzdem nagelfest und mindestens von

D-Qualität, abgesehen von wenigen Proben direkt unterhalb der Köpfungsstelle. Ferner ergibt sich eine direkte Beziehung zwischen der Größe der Schnittfläche und der Eindringtiefe des Pilzes. Dieser Befund stimmt mit Beobachtungen an gebrochenen Fichten überein (ROHMEDEK 1937).

Nach Auswertung der verfügbaren Literatur zum Fortschritt der Zopffäule (z.B. STACH 1925, BEYREUTHER 1958; von JENA 1967; HÜTTE 1967a; RICHTER 1975) läßt darauf schließen, daß der Fäulnisfortschritt abhängig von der Sauerstoffversorgung des Pilzes ist. Seine Wachstumsgeschwindigkeit nimmt mit zunehmender Entfernung von der Schnittstelle ab. Nach mangelnder Sauerstoffversorgung kommt die Zopffäule dann zum Stillstand. Für weitere Überlegungen kann daher von einer durchschnittlichen Holzentwertung von etwa 2 m ausgegangen werden.

Eine **Behandlung der Schnittflächen** mit Holzteer, Xylamon oder Karbolinum wird in einigen Veröffentlichungen beschrieben (WINTERFELD 1967; HÜTTE 1967a). Nach neueren Untersuchungen (HÜTTE 1983) sind nach 15 Jahren 80 % der behandelten Schnittflächen ohne Fäulnis. Angesichts des geringen Ausmaßes der Fäulnis wird bei den weiteren Überlegungen dieser Arbeit davon ausgegangen, daß durch eine Schnittflächenbehandlung insgesamt keine positiven wirtschaftlichen Effekte erreicht werden.

#### **2.4.4 Zuwachsverluste in der Köpfungszone**

Zuwachsverluste durch Wipfelköpfung entstehen

- am geköpften Einzelbaum durch die verlorene Nadelmasse
- innerhalb der gesamten Köpfungszone durch vorzeitiges Ausscheiden einzelner Bestandesglieder

Für **Einzelbäume** sind bisher keine Zuwachsuntersuchungen nach erfolgter Wipfelköpfung bekannt. Daher mußte auf die zu Kronenbruchschäden vorhandene Literatur (z.B. BURGER 1953; KARIGL 1965) zurückgegriffen werden.

Eine Auswertung der Literatur zeigt allerdings, daß weder exakte Angaben zum Bruchgrad noch zum Alter der durch Bruch geschädigten Bäume oder Bestände gemacht werden. Damit können Zuwachsverluste von Bäumen mit definiertem Bruchgrad oder entsprechend definiertem Köpfungsgrad nicht abgeschätzt werden. Hinzu kommt, daß neben dem absoluten Zuwachsverlust unmittelbar nach der Köpfung auch die Frage geklärt werden muß, innerhalb welcher Zeit geköpfte Bäume in der Lage sind, die Krone zu regenerieren und so das normale Zuwachsniveau wieder zu erreichen.

Auch hierfür gibt es keine einfache Antwort, da eine Vielzahl von Faktoren die Kronenregeneration maßgeblich beeinflusst (vergl. ROHMEDER 1937):

- das Alter der Bäume
- der Standort, vor allem die Wasserversorgung
- die Höhe der Köpfungsstelle
- die Größe der Schnittfläche
- der Wassergehalt der leitenden Zellen

In Anbetracht der komplexen Zusammenhänge kann es nicht verwundern, daß quantitative Angaben über die Kronenregeneration nach Wipfelköpfung, ggf. in Abhängigkeit vom Köpfungsgrad, nicht vorliegen. Daher wird in vorliegender Arbeit versucht, die Zuwachsveränderungen über Nettofotosyntheseraten einzelner Kronenschichten abzuschätzen. Dabei stützen wir uns auf eine Untersuchung von SCHULZE et al. (1977), die im Solling Nettofotosyntheseraten einzelner Kronenschichten und Nadeljahrgängen an Fichte untersuchten. Die Ergebnisse dieser Arbeit stimmen im wesentlichen mit denen von WOODMAN (1971) überein. Diese Angaben werden daher der Zuwachsverlustschätzung zugrunde gelegt.

In der Köpfungszone entstehen neben den Zuwachsverlusten am Einzelbaum auch flächenbezogene Zuwachsverluste durch das vorzeitige Ausscheiden von Bäumen. Nicht nur die Sommertrocknis, sondern auch die Frosttrocknis spielt dabei unter bestimmten Voraussetzungen eine gewisse Rolle (vergl. HÜTTE 1964a). Nach Auswertung der Literatur (von JENA 1967; HÜTTE 1967a; OEHLER 1969) treten Trocknisschäden ganz überwiegend dadurch auf, daß Bäume mit zu

geringem Bekronungsgrad geköpft wurden oder zu große Kronenteile entnommen wurden. Um Trocknisschäden und die damit verbundene Gefahr von Borkenkäferbefall zu vermeiden, wird empfohlen, nicht mehr als 60 % der Kronenlänge zu köpfen (HÜTTE 1967a; MASCHER 1965). Da bei sachgemäßer Ausführung die Ausfälle innerhalb der Köpfungszone geringfügig sein dürften, wird der vorzeitige Ausfall von Bäumen in der Köpfungszone bei der nachfolgenden Modellkalkulation nicht berücksichtigt.

#### **2.4.5 Verluste durch sonstige Schäden**

Durch den Verlust eines beachtlichen Teiles der grünen Krone werden die geköpften Fichten physiologisch geschwächt, was die Risiken weiterer Schäden in sich birgt. Zu nennen sind hier verstärkter Pilzbefall (HÜTTE 1983), durch das Besteigen verursachte Rindenverletzungen und Harzgallenbildung (von JENA 1967) oder verminderte Raumdichte des nach der Köpfung gebildeten Holzes (VOLKERT 1940).

Zur Revitalisierung des geköpften Bestandesrandes ist empfohlen worden, eine Düngung vorzunehmen, um so den beschriebenen Folgewirkungen zu begegnen (HÜTTE 1986). Erfahrungen hinsichtlich der Wirkung und der günstigsten Zusammensetzung einer solchen Düngung liegen bisher nicht vor.

Bei der weiteren Modellkalkulation werden wegen der Schwierigkeit einer exakten Quantifizierung die sonstigen Schäden nicht berücksichtigt. Im Einzelfall kann es jedoch durchaus angemessen sein, durch einen Risikoabschlag gutachtlich diese Verluste zu berücksichtigen.

#### **2.5 Leistungen der Wipfelköpfung**

Die Leistungen einer erfolgreich durchgeführten Wipfelköpfung bestehen in der Vermeidung direkter und indirekter Sturmschäden. Eine umfassende Beschreibung dieser Sturmschäden gibt ROTTMANN (1986).

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht verringern Sturmschäden den Erfüllungsgrad eines oder mehrerer Zielelemente in einem vorgegebenen betrieblichen Zielsystem. Die Bewertung eines sturmbedingten Schadensereignisses setzt daher die Kenntnis des jeweiligen betrieblichen Zielsystems voraus.

Für die öffentlichen Wälder des Landes Rheinland-Pfalz ist die kontinuierliche und möglichst hohe Produktion wertvollen Holzes ein wichtiges Element in der Gesamtzielsetzung. Alle Ereignisse, die zu einer Störung der nachhaltigen Erzeugung und Bereitstellung wertvollen Holzes führen, verringern daher zwangsläufig den Erfüllungsgrad und sind daher als Schäden zu bewerten. Dies dürfte im übrigen für die meisten Nachhaltigkeitsbetriebe mitteleuropäischer Prägung Gültigkeit haben.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über Kriterien, nach denen die betrieblichen Folgen von Sturmschäden geordnet werden können. Die meisten Kriterien lassen sich monetär als Mindererlöse oder Mehraufwendungen bewerten. Damit kann ebenfalls die Leistung einer erfolgreichen Wipfelköpfung abgeschätzt werden.

Tabelle 2 vermittelt einen, wenn auch nur unvollständigen Eindruck der vielfältigen Auswirkungen der Sturmschäden auf forstbetriebliche Zielelemente. Sie verdeutlicht das außerordentliche Gewicht der Folgeschäden für den Forstbetrieb und den Erfüllungsgrad einzelner Zielelemente.

Neben den einzelbetrieblichen Schäden gibt es eine Reihe negativer **volkswirtschaftlicher Effekte**. Als Beispiele können Aufwendungen für notwendig gewordene Nachtragshaushalte, die staatlichen Unterstützungen bei Kalamitäten für Privatwaldbesitzer oder Steuermindereinnahmen nach § 34b EStG angeführt werden. Außerdem entstehen ordnungspolitische Probleme im Hinblick auf die Stabilität des inländischen Holzmarktes. Alle diese Effekte bleiben bei der nachfolgenden Modellentwicklung außer Betracht.

**Tab. 1: Einteilung der Sturmschäden nach verschiedenen Kriterien**  
*Classification of negative storm effects according to different criteria*

Einteilungskriterium	Schadensarten	Beispiele
Sichtbarkeit	sichtbare unsichtbare	Brüche Faserstauchungen
Flächengröße	Einzel Schäden Flächenschäden	Stammbrüche Nestwürfe Gassenwürfe
Zeitpunkt des Schadenseintritts	direkte Schäden (= Primärschäden)  indirekte Schäden (= Sekundär- oder Folgeschäden)	Brüche Schaden an Natur- verjüngung Holzpreisverfall Insektenschäden
Art der geschädigten Werte	materielle Schäden  monetäre Schäden  ideelle Schäden	Holzentwertung d. Bruch, Käferbefall Verluste durch unzeitige Nutzung erhöhte Werbung- kosten

**Tab. 2:** Sturmbedingte Folgeschäden im Forstbetrieb  
*Follow-up damages in a forest enterprise due to storm*

(gegliedert nach betroffenen Elementen forstlicher Zielsysteme)  
*(classified according to affected elements of forestry goal systems)*

betroffenes Zielelement	Beispiele für Folgeschäden
Sachgüterproduktion	Abtrieb hiebsunreifer Bestandesreste Destabilisierung von Nachbarbeständen Wurzelrisse Rotfäulegefährdung Zuwachsverluste Rißbildungen Faserstauchungen Schäden durch Rindenbrand Pilz- und Insektenschäden Qualitätsverluste durch Lagerung Bodenschäden Hemmung der Naturverjüngung Probleme in der Kulturbegründung Probleme bei der Pflanzmaterialbeschaffung Unter-/Vorbau in verlichteten Beständen häufige Kulturpfllegemaßnahmen Störung des Altersklassenverhältnisses Veränderung der zeitlichen Arbeitsplanung Erhöhung der Hiebsfrequenz i.d. Folgejahren Einsatz von Unternehmern
forstliche Dienstleistungen/ Sozialfunktion	geringere Betreuungsmöglichkeiten negative Folgen für den Wasserhaushalt verminderter Erosionsschutz Beeinträchtigung des Erholungswertes (Wegeschäden, Landschaftsbild ....)
monetäre Ziele	Hiebsunreiferverluste Abbau von Betriebsvermögen Verringerung der Deckungsbeiträge Lagerhaltungskosten (Naßkonservierung) Probleme bei der Produktvermarktung höhere Instandhaltungskosten für Wege höhere Forstschutzaufwendungen höhere Personalaufwendungen
Sicherheitsziele	Destabilisierung von Beständen Störung der Nachhaltigkeit in ihren verschiedenen Formen Störung der räumlichen Ordnung Rückstellung dringender waldbaulicher Maßnahmen Vorratsabbau langfristige Gefährdung der Liquidität

### 3. DAS ENTSCHEIDUNGSMODELL

#### 3.1 Herleitung des Entscheidungsmodells

Bereits bei der Beschreibung der Kosten einer Wipfelköpfung ist deutlich geworden, daß die Kosten zum Zeitpunkt der Entscheidung nicht direkt als betriebliche Werte aktuell dem Rechnungswesen entnommen werden können. Vielmehr sind Prognosen hinsichtlich Zuwachsgang und Fäulniswirkung erforderlich und zwangsläufig mit Unsicherheiten behaftet. Dies gilt in noch viel größerem Maße für die Ermittlung der Leistung einer Wipfelköpfung. Die Quantifizierung der Leistungen einer Wipfelköpfung stößt auf eine Reihe grundsätzlicher und erheblicher bewertungstechnischer Schwierigkeiten:

- a) Sturmschäden sind Eventualschäden und daher hinsichtlich Umfang und Zeitpunkt ihres Eintretens nicht vorhersehbar
- b) die Wirksamkeit der Wipfelköpfung als einer in die Zukunft gerichteten Präventivmaßnahme kann zum Zeitpunkt der Entscheidung nicht exakt bestimmt werden.

Ein Urteil über die Leistung und damit auch über die Wirtschaftlichkeit einer Wipfelköpfung setzt daher zwingend voraus

- eine Prognose der zu erwartenden bzw. zu verhindernden Sturmschäden
- eine Risikoabschätzung hinsichtlich der Wirksamkeit von Wipfelköpfung.

Aufgrund der vielfältigen Unwägbarkeiten soll daher ein Erklärungsmodell entwickelt werden, das die tatsächlichen und die potentiell möglichen Kosten und Leistungen von Köpfungsmaßnahmen auf eine überschaubare Zahl wesentlicher Faktoren reduziert. Dieses Erklärungsmodell bildet gleichzeitig die Grundlage zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit konkreter Wipfelköpfungsmaßnahmen (Entscheidungsmodell).

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht wird dieses Urteil nur positiv sein können, wenn die Leistungen mindestens das Niveau der Kosten erreichen. In Anbetracht der vielen Unwägbarkeiten wird aller-

dings zu fordern sein, daß die Leistungen erheblich über dem Wert der Kosten liegen. Werden Kosten (K) und Leistungen (L) zu ihrem Jetztwert (zum Zeitpunkt x der Entscheidung) angesetzt, so ergibt sich folgende Entscheidungsregel für die Durchführung einer Wipfelköpfung:

$$(1) L_x \gg K_x$$

Die Bewertung der Wipfelköpfung geht vom Vergleich zweier Güterlagen aus; d.h. sie erfaßt den Unterschied zwischen einer Situation mit bzw. ohne Wipfelköpfung. Dabei ist das Ergebnis dieser Bewertung sehr stark beeinflusst von der "Lebensdauer" eines Köpfungsbestandes im Vergleich zu der des ungeköpften Bestandes. Bezüglich der in der Entscheidungspraxis außerordentlich schwierigen Risikoeinschätzung wird auf die Untersuchungen von HEUPEL et al. in diesem Heft verwiesen.

Je nach den unterschiedlichen Zeitpunkten, an denen der geköpfte Bestand bzw. der (fiktive) ungeköpfte Vergleichsbestand aus der planmäßigen Produktion teilweise oder vollständig ausscheidet, sowie je nach dem Umfang der Beeinträchtigung dieser Bestände lassen sich nahezu beliebig viele Bewertungskonstellationen zusammenfügen. Tabelle 3 zeigt als Ausschnitt zwei extreme Bewertungssituationen. Dabei ist unterstellt, daß ein geköpfter Bestand bis zum Ende der Umtriebszeit u ohne Beeinträchtigung aushält.

**Tab. 3:** Kosten und Leistungen der Wipfelköpfung in Abhängigkeit von der Lebensdauer des (fiktiven) ungeköpften Vergleichsbestandes.

*Cost and benefit of crown topping dependent on survival age of an (assumed) untopped stand*

Nr. der Konstellation	Lebensdauer des ungeköpften Bestandes	Bewertung der Wipfelköpfung
(1)	bis zum Ende der Umtriebszeit	Köpfungskosten ( $K_x$ ) ohne Leistung ( $L_x$ ) $K_x > 0$ $L_x = 0$
(2)	fällt unmittelbar nach dem Zeitpunkt x der Entscheidung um	Köpfungskosten mit höchster Leistung $k_x > 0$ $L_x \Rightarrow \max$

Werden sowohl die Lebensdauer des ungeköpften Bestandes als auch des geköpften Bestandes variiert, so sind sämtliche verbleibenden Möglichkeiten in den 4 weiteren Konstellationen der Tabelle 4 angegeben.

**Tab. 4:** Bewertungskonstellationen in Abhängigkeit von der Lebensdauer des ungeköpften bzw. geköpften Bestandes

*Evaluation situations dependent on the survival time of the untopped and topped stand respectively*

Nr. der Konstellation	Erreichtes Alter	
	des ungeköpften Bestandes	des geköpften Bestandes
(3)	m	u }
(4)	x	l } für
(5)	m	l } $x < m < l < u$
(6)	x	x }

Die zukunftsbezogene **Leistungsbewertung** von Köpfungsmaßnahmen muß die bei plangemäßer Lebensdauer mit dem Köpfungsbestand verbundenen Erlöserwartungen einbeziehen. Daher kann auf das klassische Modell der Bestandesbewertung zurückgegriffen werden. Die Differenz aus dem Bestandeserwartungswert ( $HE_1$ ) und dem Abtriebswert ( $A_1$ ), die sogenannte Hiebsunreife, kennzeichnet die Leistung der Wipfelköpfung, sofern der geköpfte Bestand das Ende der Umtriebszeit erreicht, ungeköpft jedoch flächig zum Entscheidungszeitpunkt  $x$  geworfen worden wäre. Entsprechend sind die Bewertungsansätze für unterschiedliche Lebensdauern zu entwickeln.

Leistungserhöhend wirkt bei den Konstellationen 2 bis 5 die Tatsache, daß sturmbedingte Folgeschäden vermieden werden. Sie fallen zeitlich gestaffelt nach dem Ausscheiden des ungeköpften Bestandes an und sind bis zum Ausscheiden des geköpften Bestandes anzurechnen. In den Modellkalkulationen konnten diese Folgeschäden allerdings nicht berücksichtigt werden, da sich keine allgemein anwendbaren Größenordnungen abschätzen ließen. Für die An-

wendung der Ergebnistabellen auf konkrete Entscheidungen bedeutet dies, daß die Leistungen der Wipfelköpfung keinesfalls zu hoch eingeschätzt sind.

Alle in der Zukunft liegenden Leistungen und Leistungsminderungen sind auf den Entscheidungszeitpunkt  $x$  zu beziehen. Um Widersprüchlichkeiten im Modell zu vermeiden, wird die Reduktion künftiger Werte  $L_1$  an dem Verlauf der Bestandeswertentwicklung orientiert:

$$(2) L_x = HE_x : HE_1 \times L_1$$

Nach den Überlegungen zu den **Kosten** der Wipfelköpfung sind folgende Kostenkomponenten zu bewerten:

- Kosten der erstmaligen Köpfung und der Nachköpfungen **EK**  
bzw. **NK**
- Kosten durch geköpftete Wipfelstücke **W**
- Kosten durch **Faulholz** am Zopf **F**
- Kosten durch **Zuwachsverluste** in der Köpfungszone **Z**

Diese Kostenkomponenten fallen zu unterschiedlichen Zeitpunkten an. Während die erstmalige Köpfung zum Entscheidungszeitpunkt  $x$  kostenwirksam wird, sind die Kosten der Nachköpfung unter Umständen mehrfach in zeitlichen Abständen anzusetzen. Die direkten Kosten der Nachköpfungen betragen allerdings wegen der geringen betroffenen Flächengröße nur Bruchteile der Kosten für die erstmalige Köpfung. Zur Vereinfachung werden sie daher gutachtlich mit einem prozentualen Zuschlag zu den Kosten der erstmaligen Köpfung abgerechnet. Diese Zuschläge liegen zwischen 0 % und 20 %, wobei 20 % Zuschlag für früheinsetzende Köpfung mit langer Lebensdauer gewählt werden sollte. Eine detaillierte Herleitung der Nachköpfungskosten findet sich bei DEINET (1988).

Das Ausmaß der Kosten für Wipfelstücke, Faulholz und Zuwachsverluste wird erst am Ende der Lebensdauer des geköpften Bestandes erkennbar. Alle diese Kostenkomponenten sind einheitlich auf den Entscheidungszeitpunkt zu beziehen. Auch hier erscheint es zweckmäßig, nicht den finanzmathematischen Weg der Diskontierung zu wählen, sondern analog zum Vorgehen bei den Leistungen die künf-

tigen zu erwartenden Kosten ebenfalls an der Wertentwicklung des Bestandes zu orientieren. Auf diese Weise wird vermieden, daß künftige Leistungen anders bewertet werden als künftige Kosten.

$$(3) \quad K_x = EK_x + E_x \cdot \frac{S}{100} + \frac{HE}{HE_1} (W_1 + F_1 + Z_1)$$

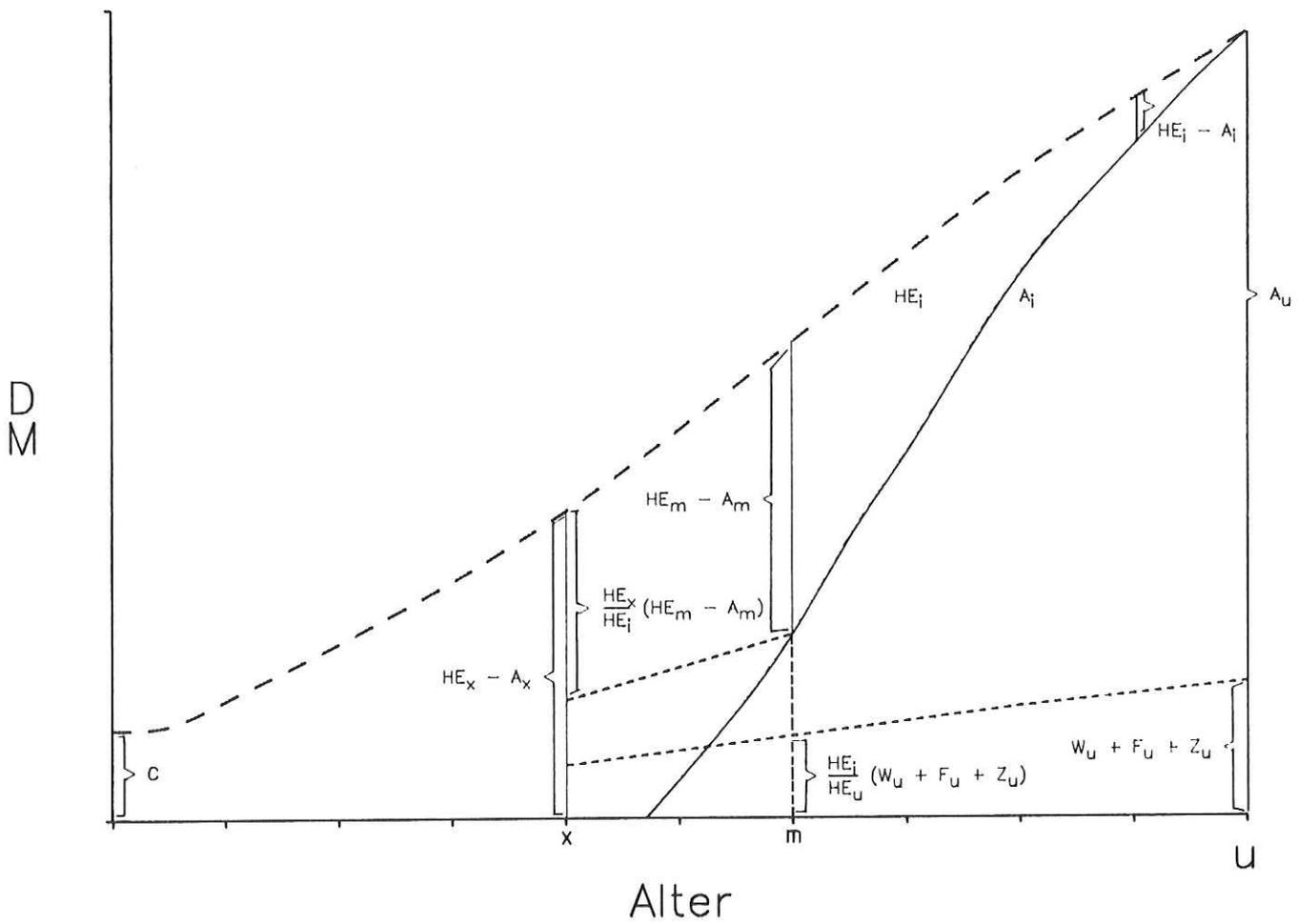
Die für die einzelnen Bewertungskonstellationen gewählten Modellansätze sind Tabelle 5 zu entnehmen und in Abbildung 1 graphisch erläutert.

**Tab. 5:** Zusammenstellung der Modellansätze für ausgewählte Bewertungskonstellationen. Die Entscheidung über die Köpfung und die Köpfung selbst erfolgen zum gleichen Zeitpunkt x.  
*Evaluation models for selected situation. Decision making and crown topping take place at the same time x.*

- Symbole:  $A_1$  = Abtriebswert  
 Symbols:  $HE_1$  = Bestandeserwartungswert  
 $EK_1$  = Kosten für erstmalige Köpfung  
 $u$  = Umtriebszeit  
 $c$  = Kulturkosten  
 $s/100$  = Zuschlag für Nachköpfung  
 $W_1$  = Verluste durch geköpfte Wipfelstücke  
 $F_1$  = Verluste durch Faulholz am Zopf  
 $Z_1$  = Zuwachsverluste

Nr. d. Ko.	erreichtes Alter		Leistung $L_x =$	Kosten $K_x =$
	ungeköpft	geköpft		
1	u	u	0	$EK_x + EK_x \cdot \frac{S}{100} + \frac{HE_x}{HE_u} (W_u + F_u + Z_u)$
2	x	u	$HE_x - A_x$	wie vor
3	m	u	$\frac{HE_x}{HE_m} (HE_m - A_m)$	wie vor
4	x	l	$HE_x - A_x - \frac{HE_x}{HE_1} (HE_1 - A_1)$	$EK_x + EK_x \cdot \frac{S}{100} + \frac{HE_x}{HE_1} (W_1 + F_1 + Z_1)$
5	m	l	$\frac{HE_x}{HE_m} (HE_m - A_m) - \frac{HE_x}{HE_1} (HE_1 - A_1)$	wie vor
6	x	x	0	$EK_x + EK_x \cdot \frac{S}{100}$

**Abb. 1:** Das Bewertungsmodell, zur Erläuterung der Symbole vgl. Tabelle 5  
*The evaluation model*



## 3.2 Bewertungsgrundlagen und -methoden

### 3.2.1 Ermittlung der Erwartungswerte und Abtriebswerte

Als Modellbestände werden Bestände gewählt, die den Ertragsklassen I, II und III der Ertragstafel Wiedemann (1936) für Fichte, mäßige Durchforstung, entsprechen. Diese Tafeln sind in der Forsteinrichtung des Landes Rheinland-Pfalz gebräuchlich und geben den Höhenwuchsverlauf der Bestände zutreffend wieder (PEERENBOOM und PETRI 1986). Hinsichtlich der Durchmesserentwicklung und der Gesamtwuchsleistung gibt es jedoch deutliche Abweichungen zur Ertragstafel. In Ermangelung anderer, aktueller Bestandesmodelle müssen diese Einschränkungen hingenommen werden.

Fichtenbestände gelten ab dem Alter 50 als sturmgefährdet (z.B. HEGER 1948; BOSSHARD 1967). Die empirischen Untersuchungen von HEUPEL et al. (im gleichen Heft) belegen allerdings eindrücklich, daß bereits in jüngerem Bestandesalter erhebliche Sturmwürfe eintreten.

Die Abtriebswerte und Hiebsunreifen werden daher für die gesamte Lebensdauer eines Bestandes in 5-Jahresabständen berechnet. Sie sind der Tabelle 1 im Anhang zu entnehmen.

Die planmäßige Umtriebszeit für die Modellbestände wird mit 100 Jahren angenommen. Dies entspricht dem Mittel des in der Forsteinrichtungsanweisung für den Staats- und Körperschaftswald Rheinland-Pfalz 1972 angegebenen Altersrahmen für das Nutzungsalter im Produktionstyp Fichte. Darüberhinaus werden die Modelle bis zum Alter 120 kalkuliert, um den Einfluß einer längerfristigen Köpfungswirkung darzustellen.

Die Abtriebswerte werden mit dem Waldbewertungsprogramm "Orakel" (Autor: HOFFMANN) der Landesforstverwaltung Rheinland-Pfalz berechnet. Die Güteklassen- und Sortenstruktur wird als Kombination der Güteklassenstruktur des Rohholzpreisberichtes der Landesforstverwaltung Rheinland-Pfalz von 1985 und der Sortentafel SCHÖPFER/DAUBER berechnet. Getrennt für die Güteklassen A, B und

C/D werden ideale Mittendurchmesser berechnet. Da die besseren Güteklassen in der Regel im unteren Stammteil liegen und damit einen höheren Mittendurchmesser aufweisen, wird somit eine praxisnahe Sortierung ermöglicht.

Die Bestandessortentafel für Fichte von SCHÖPFER/DAUBER hat als Eingangsgröße den mittleren Brusthöhendurchmesser des Bestandes. Neben den Stammholz- und Industrieholzprozenten werden x-Holzprozente, mittlerer Durchmesser des Industrielangholzes, auszuhaltende Länge, Zopfdurchmesser, Güteklassenverteilung nach A, B- und C-Holz sowie Vorgabe- und Motorsägezeiten ausgewiesen. Durchschnittliche Schadholzprozente sind in der Güteklassenverteilung bereits implizit enthalten, sodaß sie bei der Kalkulation nicht gesondert berücksichtigt werden müssen.

Die Rückekosten für Stamm- und Industrieholz stützen sich auf einen regionalen Rücketarif des rheinland-pfälzischen Stützpunktforstamtes Hinterweidenthal-West und sind im Programm fest installiert. Geldfaktoren, Lohnnebenkosten und Holzerlöse beziehen sich auf das Jahr 1988.

Die Berechnung des Bestandeserwartungswertes verwendet die neuen, von der Arbeitsgemeinschaft Waldbewertung und dem Deutschen Forstwirtschaftsrat empfohlenen Alterswertfaktoren (vergl. Anhang, Tab. 5). Die zur Berechnung notwendigen Kulturkosten wurden mit 6600.- DM angesetzt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind im Anhang, Tab. 1, zusammengefaßt wiedergegeben.

### **3.2.2 Bewertung der Köpfungskosten**

Da keine Kostensätze für die Durchführung der Wipfelköpfung aus neuerer Zeit vorliegen, wurden diese durch Befragung von forstlichen Dienstleistungsunternehmen erhoben. Insgesamt wurden 3 in Rheinland-Pfalz vorwiegend tätige Dienstleistungsunternehmen befragt. Die dort ermittelten Kostensätze orientieren sich im wesentlichen an der Bestandeshöhe und somit indirekt an Ertragsklasse und Alter des zu köpfenden Bestandes. Die Kostensätze der 3 Unternehmen wurden arithmetisch gemittelt und getrennt für die

3 Ertragsklassen für jedes der gewählten Köpfungsalter berechnet. Die berechneten durchschnittlichen Kostensätze sind Bruttopreise und enthalten 14 % Mehrwertsteuer. Um zu Hektarwerten zu gelangen, werden die Köpfungskosten pro Stamm mit den Stammzahlen der Ertragstafel Wiedemann hochgerechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind im Anhang, Tab. 2, zusammengestellt.

Bei Bestockungsgrad 0,8 erhöhen sich die Kosten nach übereinstimmenden Firmenangaben um 10 bis 15 %. In unter 50-jährigen Beständen ergibt sich nach Firmenangaben technikbedingt kein Preisunterschied zwischen vollbestockten und weniger bestockten Beständen.

### **3.2.3 Bewertung der Kosten durch geköpfte Wipfelstücke und durch Faulholz am Zopf**

Die Kosten durch geköpfte Wipfelstücke und durch Faulholz am Zopf ergeben sich als Differenz der Abtriebswerte geköpfter und ungeköpfter Bestandesteile, der sogenannten Köpfungszone. Die Volumen- und Massendifferenzen werden über Mittelstammverfahren hergeleitet. Höhe und Durchmesser der Mittelstämme werden für unterschiedliche Alter und Bonitäten der Ertragstafel entnommen.

Das unter Ziff. 3.2.1 beschriebene Verfahren der Abtriebswertberechnung konnte nicht verwendet werden, da das verfügbare Programm keine einfache Möglichkeit für eine geänderte Sortierung anbietet. Erhebliche Abweichungen, die sich aus der Wahl des Mittelstammverfahrens gegenüber der Bestandessortentafel ergeben könnten, sind nicht zu befürchten, wie Untersuchungen von ANDREE (1989) erst kürzlich wieder bestätigt haben.

Für die Bewertung wird unterstellt, daß sich der geköpfte Bestand bezüglich Durchmesser- und Volumenentwicklung weiterhin ertragstafelkonform verhält; d.h. lediglich die Höhenentwicklung stagniert aufgrund der Köpfung und führt zu geringerer Ausbeute an nutzbarem Volumen. Zuwachsänderungen durch den Verlust grüner

Kronenteile werden allerdings gesondert erfaßt und entsprechend differenziert bewertet (vergl. Ziff. 3.2.4). Für weitergehende Differenzierungen fehlen tragfähige Datengrundlagen.

Zur Ermittlung der Sortengrenzen zwischen Stamm- und Industrieholz werden die Ausbauchungsreihen von BERGEL (1981) den Modellstämmen unterlegt. Der Mindestzopf für Stammholz wird mit 12 cm m.R., der für Industrieholz mit 8 cm m.R. angenommen. Der Stammholzmitteldurchmesser wurde, nach Abzug von 30 cm Stubbenhöhe und von 1 % Längenzugabe, aus der Schaftkurve entnommen. Die Stammholzmasse ergibt sich nach der praxisüblichen Mittelflächenformel und wird um durchschnittliche Rindenanteile (ALTHERR 1978) gekürzt. Mit der Stammzahl je Hektar aus der Ertragstafel multipliziert ergibt sich die Stammholzmasse je Hektar. Analog wird das Industrieholz (ISN) ausgehalten.

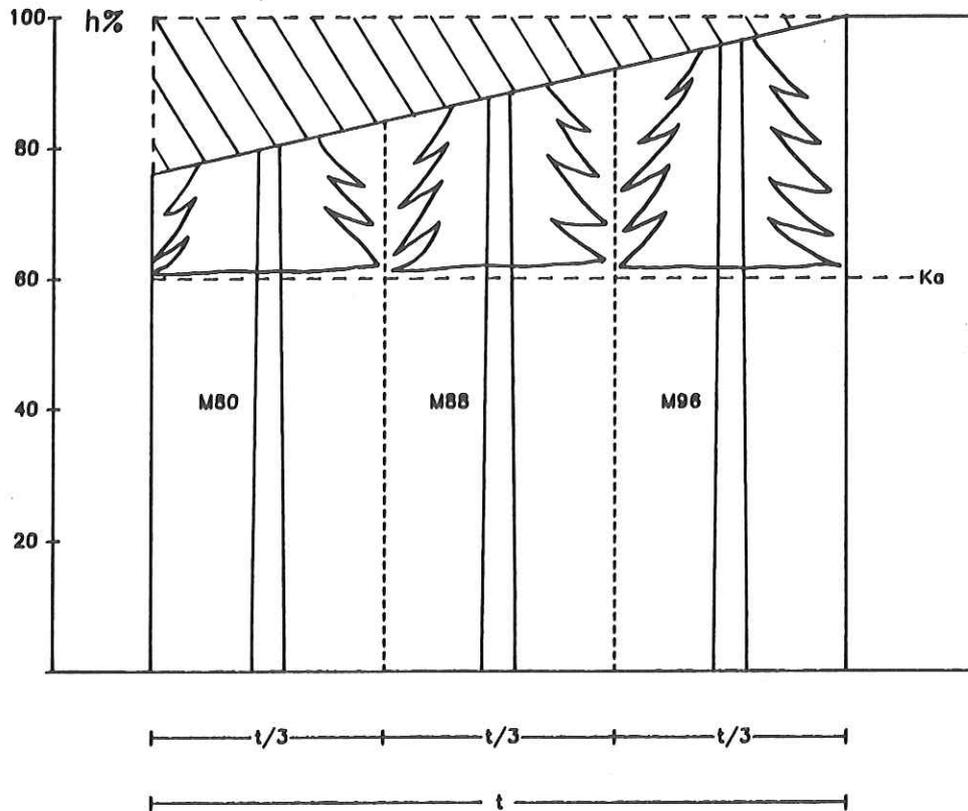
Die Holzerlöse entsprechen den bereits im Abschnitt 3.2.1 verwendeten Angaben und werden mit den Güteanteilen für Stammholz entsprechend der Bestandessortentafel gewichtet. Die Werbungskosten werden nach den seit 1.5.1988 gültigen Geldtafeln zum EST 1988 berechnet, Rückekosten entsprechend den in Ziff. 3.2.1 verwendeten Werten.

Die Volumen- und Sortenanteile in der Köpfungszone werden an jeweils 3 Modellstämmen mit unterschiedlichen Köpfungsgraden ermittelt. Damit werden die typische Abschrägung der Köpfungszone und die dadurch ansteigende Höhe der Köpfungsstelle berücksichtigt (vergl. Abb. 2). Unterstellt werden:

- Bekronungsgrad: 40 % der Baumlänge
- maximaler Köpfungsgrad am Bestandesrand: 60 % der Kronenlänge
- Köpfungstiefe: 100 % der Bestandesmittelhöhe

Daraus ergeben sich relative Köpfungshöhen der 3 Modellstämme von 80, 88 und 96 % der Bestandesmittelhöhe. Die sich ergebende absolute Köpfungshöhe wird über das gesamte weitere Bestandesleben beibehalten.

**Abb. 2:** Mittelstämme für die Ermittlung der Volumenverluste in der Köpfungszone t  
*Mean stems to calculate the volume losses within the crown topping zone t*



Für die Sortierung und den Wert des Mittelstammes ist die Lage dieser Köpfungsstelle ausschlaggebend. Je nach Ertragsklasse, Köpfungsalter, Bekronungs- und Köpfungsgrad kann sie im nichtverwerteten Schaftreisig, im Industrieholz- oder im Stammholzbereich liegen.

Für die Berechnung des Faulholzes am Zopf werden durchschnittlich 2,5 m Fäulnis am Ende des ersten Jahrzehnts nach der Köpfung unterstellt und über die nächsten Jahrzehnte unverändert beibehalten. Im Vergleich zu den Sortimentspreisen je fm für gesundes Industrieholz (IL/N = 76.- DM; IS/N = 70.- DM) werden die Preise für die faulen Zopfstücke um rund 30 % abgesenkt (IL/FK = 56.- DM; IS/FK = 50.- DM). Derbholz aus Ersatzwipfeln wird wegen der wirtschaftlich marginalen Bedeutung nicht berücksichtigt. In den 5 Fällen, in denen sich verfahrensbedingt unplausible Sprünge in der Kostenentwicklung ergeben, werden diese ausgeglichen (vgl. Tabelle 3 im Anhang).

Die Aushaltung von 4 m langem Industrieholz im Bereich des faulen Zopfstückes erbringt im Vergleich zu der Aufarbeitung von 1 m langem Schichtholz keine günstigeren Ergebnisse.

### 3.2.4 Bewertung der Zuwachsverluste

Da keine direkten empirischen Daten für den veränderten Zuwachs nach Wipfelköpfung vorliegen, wird über die geänderte Nettofotosyntheserate der geköpften Kronen eine Zuwachsreduktion ermittelt. Dabei wird ein linearer Zusammenhang zwischen Durchmesserzuwachs und Nettofotosyntheserate unterstellt. Die Biomasseanteile und Nettofotosyntheseraten einzelner Kronenschichten sind der nachstehenden Tabelle 6 zu entnehmen.

**Tab. 6:** Prozentuale Biomasseanteile (m%) und Nettofotosyntheseraten (PN%) in Licht- und Schattenkrone (LK bzw. SK), berechnet nach SCHULZE et al. 1977.

*Percentage of biomass (m%) and rates of net photosynthesis (PN%) in light and shaded crown (LK and SK) (according to SCHULZE et al. 1977)*

Kronenschicht	relative Baumhöhe %	total	
		m%	PN%
obere LK	89.8 - 100.0	22.9	25.9
untere LK	80.1 - 89.7	40.9	45.0
obere SK	70.3 - 80.0	30.5	25.0
untere SK	60.6 - 70.2	5.4	3.4
Übergangszone	53.9 - 60.5	1.0	0.7

Die auf die geköpften Kronenteile entfallenden Nettofotosyntheseraten lassen sich für die Mittelstämme aus der Tabelle 6 berechnen. Die linear interpolierten Anteile der geköpften Kronenteile an der Nettofotosyntheseleistung betragen für die 3 Mittelstämme:

$$M_{80} = 70,9 \%$$

$$M_{89} = 34,9 \%$$

$$M_{96} = 10,4 \%$$

Die Ertragstafelwerte für den laufenden Zuwachs des nächsten Jahrzehnts werden entsprechend gekürzt.

Die Zuwachsverluste verringern sich mit fortschreitender Kronenregeneration. Da keine Untersuchungen über die Geschwindigkeit und den Umfang der Kronenregeneration, insbesondere in Abhängigkeit von dem Köpfungsgrad vorliegen, wird ein hypothetischer Entwicklungsgang unterstellt (vergl. Abb. 3). Entsprechend dem Grad der Kronenkürzung werden bis zum vollen Ausgleich des Zuwachsverlustes folgende Zeiträume unterstellt:

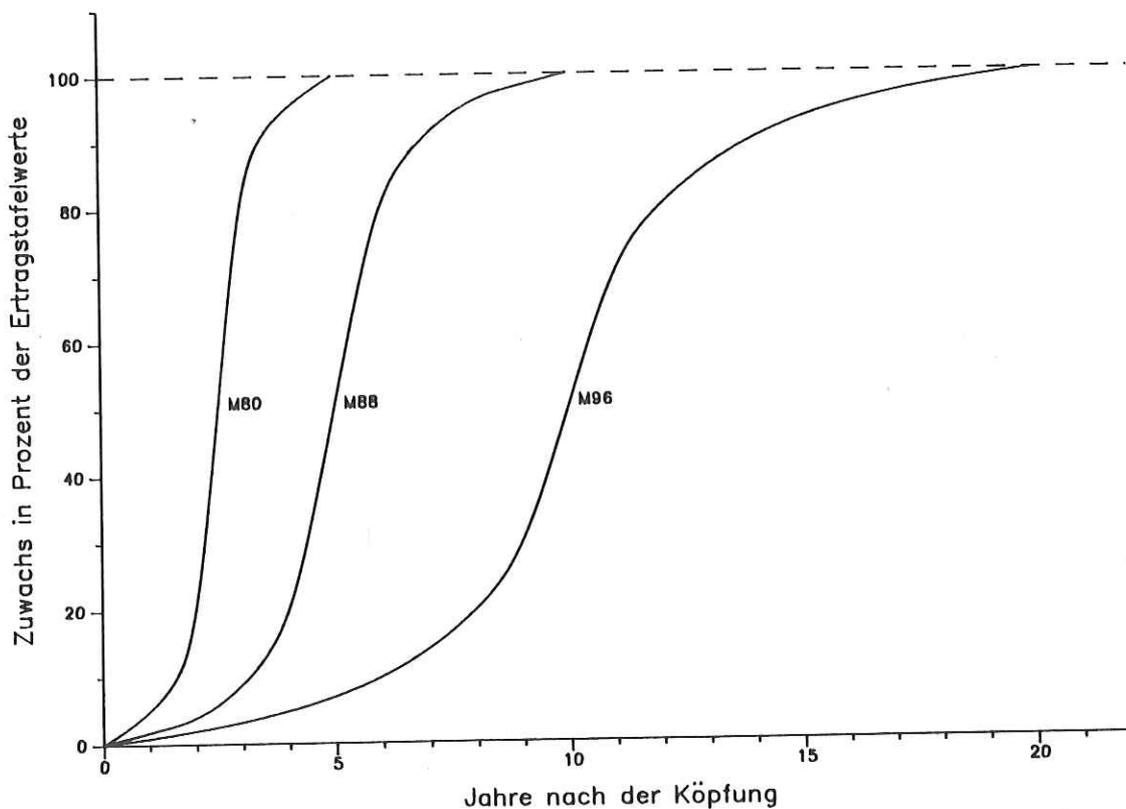
$M_{80} = 20$  Jahre

$M_{88} = 10$  Jahre

$M_{96} = 5$  Jahre

Der Ablauf der Kronenregeneration wird mit der für Wachstumsprozesse typischen Exponentialfunktion beschrieben.

**Abb. 3:** Verlauf der Kronenregeneration  
*Development of crown recovery*



Der Zuwachsverlust steigt mit zunehmendem Eingriff in die Krone, d.h. zum Außenrand hin überproportional an. Durch die Aufteilung der Köpfungszone in 3 äquidistante Streifen, wie in vorliegender Untersuchung, wird weitgehend vermieden, daß der durchschnittliche Zuwachsverlust unterschätzt wird.

Die Summe der periodischen Volumenzuwachsverluste wird mit den erntekostenfreien Stammholzerlösen zum Zeitpunkt der Endnutzung bewertet. Für dieses Vorgehen spricht, daß erst zu diesem Zeitpunkt der tatsächliche Verlust marktwirksam wird. Daß dabei auch zwischenzeitlich anfallendes Durchforstungsmaterial und die Industrieholzanteile zu Stammholzpreisen bewertet werden, führt zwar aus dieser Sicht zu einer systematischen Überschätzung des Zuwachsverlustes. Allerdings ist nicht berücksichtigt, daß die Zuwachsverluste auch zu Stämmen geringerer Dimension führen, was eine systematische Unterschätzung der Wertverluste bedeutet. Angesichts der schwachen Datenbasis und unter dem Prinzip der Vorsicht erscheint der Bewertungsansatz insgesamt jedoch angemessen. Die Ergebnisse der Berechnungen sind Tabelle 4 im Anhang zu entnehmen.

#### **4. ERGEBNISSE UND ANWENDUNGSBEISPIELE**

##### **4.1 Die Wertentwicklung der Modellbestände**

Um die mögliche Leistung von Köpfungsmaßnahmen beurteilen zu können, kommt es entscheidend auf die prognostizierte Wertentwicklung des geschützten Bestandes oder Bestandesteiles an. Nach dem in Ziff. 3.1 (Tab. 5) vorgeschlagenen Bewertungsansatz ist mit einer positiven Leistung solange zu rechnen, so lange der Bestandserwartungswert über dem Abtriebswert in dem jeweiligen Alter liegt. Dieser sogenannte Hiebsunreifeverlust wird als Maßstab für die Leistung einer Wipfelköpfung verwendet. Für negative Abtriebswerte, die bei jungen Beständen mit geringen Mengen marktfähiger Sortimenten, aber hohen Erntekosten, auftreten, wird die Hiebsunreife in Höhe des Bestandserwartungswertes angesetzt.

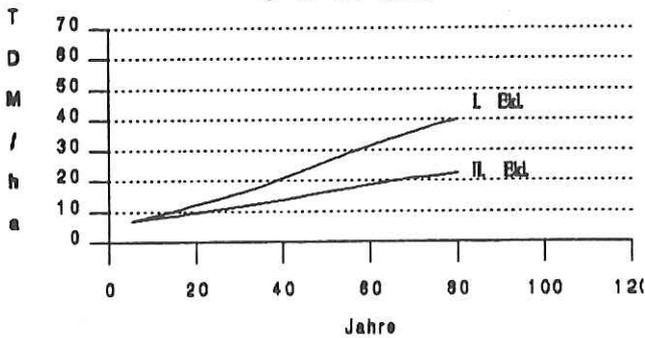
Die Wertentwicklung der Bestände wird maßgeblich durch die Ertragsklasse bestimmt. Abb. 4 verdeutlicht den Verlauf von Bestandserwartungswert und Hiebsunreife für die Ertragsklassen I, II und III der Ertragstafel Wiedemann, mäßige Durchforstung.

**Abb. 4:** Entwicklung von Bestandserwartungswert und Hiebsunreife in Abhängigkeit von Ertragsklasse und Produktionsdauer

*Development of expected stand value and loss due to untimely harvest dependent on yield class and rotation time*

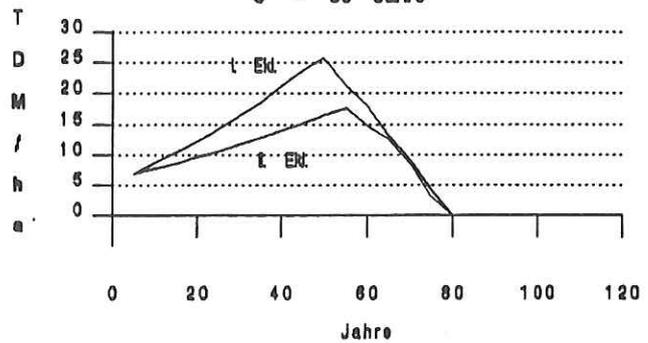
### Bestandserwartungswert

U = 80 Jahre



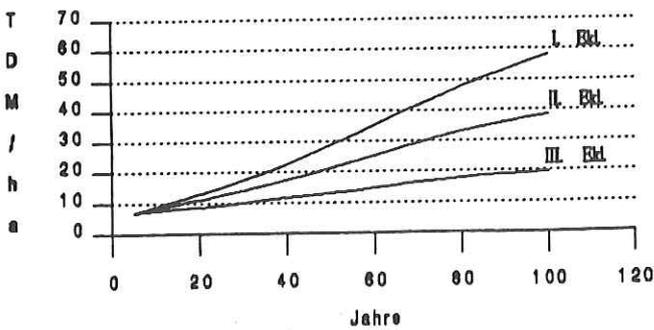
### Hiebsunreifeverlust

U = 80 Jahre



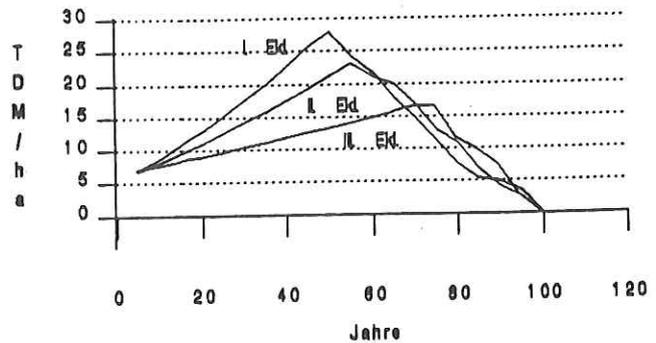
### Bestandserwartungswert

U = 100 Jahre



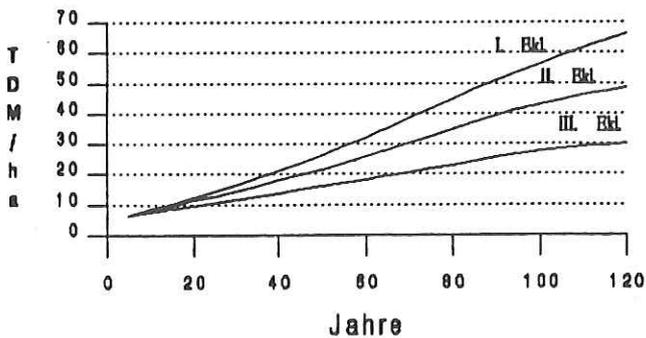
### Hiebsunreifeverlust

U = 100 Jahre



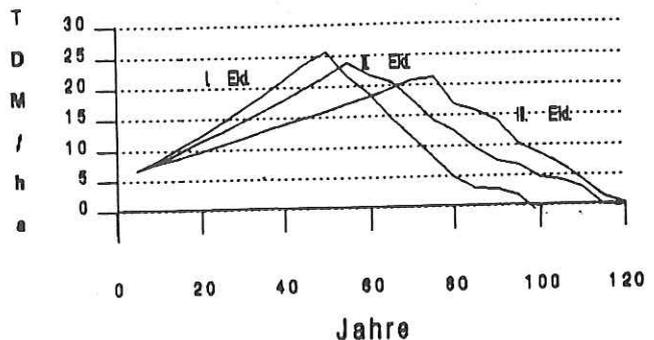
### Bestandserwartungswert

U = 120 Jahre



### Hiebsunreifeverlust

U = 120 Jahre



Der planmäßige Nutzungszeitpunkt entspringt der betrieblichen Zielsetzung und beeinflusst ebenfalls die Wertentwicklung der Bestände. Je höher die Produktionsdauer, desto größer wird - in gewissen Grenzen - auch der Wert des zu erntenden Holzes sein. Abb. 4 zeigt dies für Produktionszeiten von 80, 100 und 120 Jahren. Die relative Überlegenheit langer Produktionszeiten springt bei den geringsten Bonitäten besonders ins Auge. Für die potentielle Leistung einer Wipfelköpfung bedeutet dies, daß bei einer planmäßigen Produktionsdauer von 120 Jahren bei geringen Bonitäten durchaus noch im höheren Alter ein erheblicher Wertzuwachs gesichert werden kann.

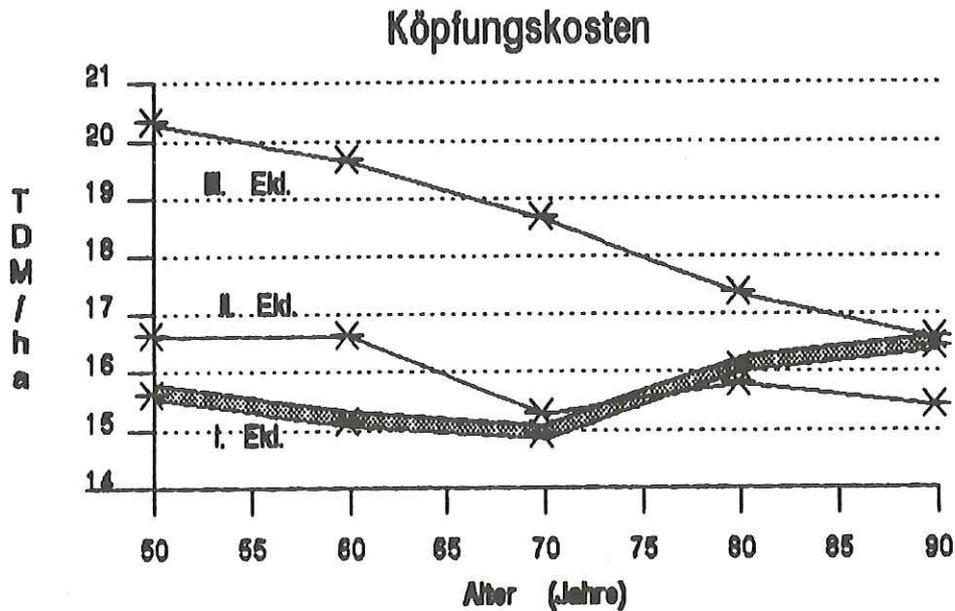
#### 4.2 Die Kosten der Wipfelköpfung

Sämtliche Kosten sind für eine einheitliche Bezugsfläche von 1 ha Köpfungszone berechnet. Für die Modellüberlegungen sind weiterhin die Bestandes- und Ertragstafeln der entsprechenden Ertragstafel Wiedemann (mäßige Durchforstung) unterlegt. Zur Kostenermittlung der erstmaligen Köpfung in konkreten Einzelfällen kann es allerdings zweckmäßig sein, auf die in dem Anhang angegebenen Kosten pro Baum zurückzugreifen.

Die Höhe der Kosten für die **erstmalige Köpfung** ist einmal abhängig von dem Stückpreis pro Baum, der mit zunehmendem Alter der Bäume ansteigt. Zum anderen werden die Kosten pro ha unmittelbar beeinflusst durch die zu köpfende Baumzahl. Wegen der gegenläufigen Entwicklung ändern sich die Kosten je ha bei den besseren Bonitäten über dem Alter relativ wenig (Abb. 5).

**Abb. 5:** Entwicklung der Kosten je ha Köpfungszone für die erstmalige Köpfung, getrennt nach Ertragsklassen

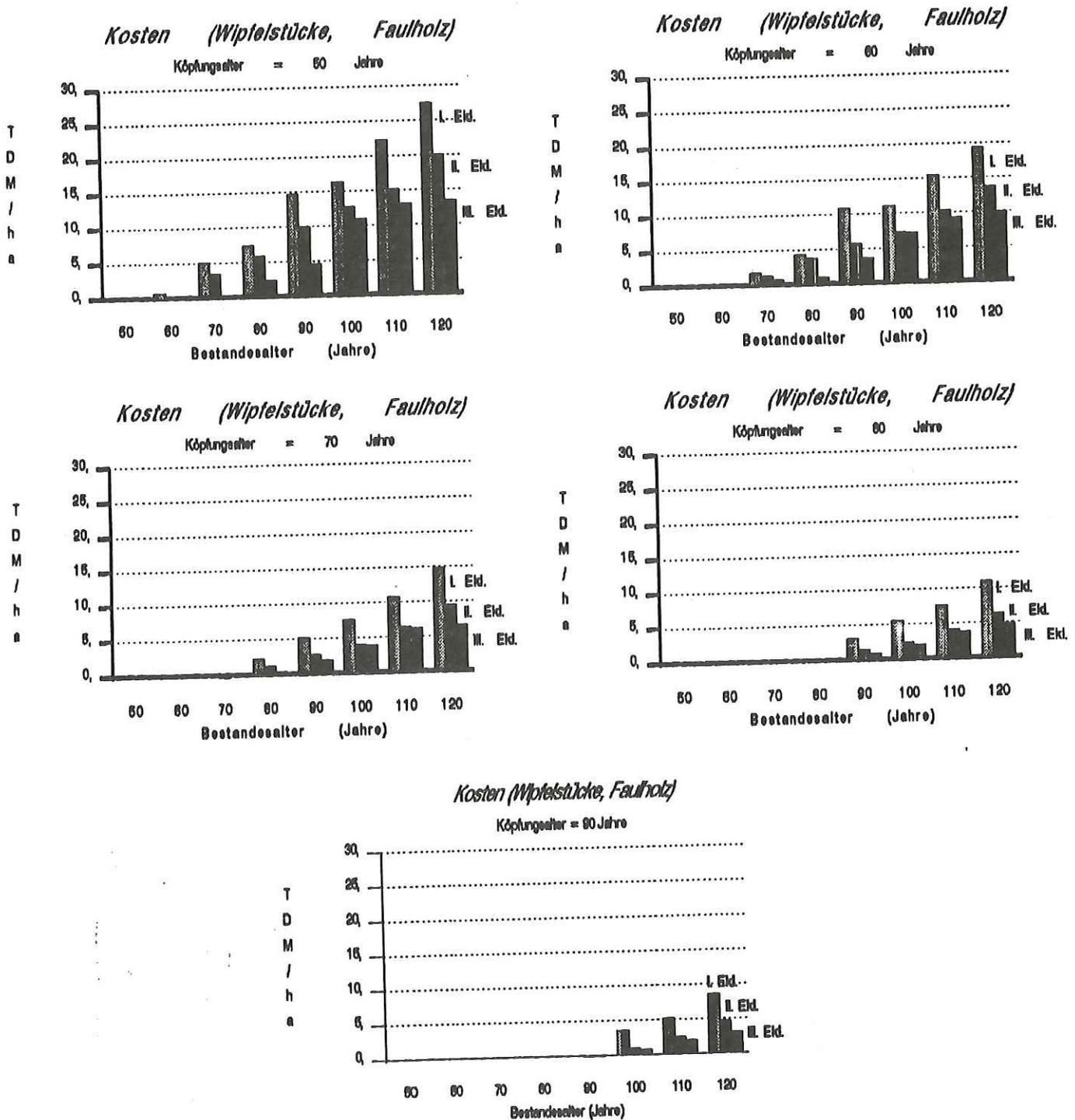
*Crown topping costs per ha crown topping zone, dependent on yield classes*



Die Kosten durch geköpfte Wipfelstücke werden ganz wesentlich bestimmt durch das Alter, in dem die Köpfung stattfindet, und durch die Zeitdauer bis zur Nutzung des Bestandes. Durch die Köpfung werden die Bäume in der Höhenentwicklung gebremst. Damit wird die Länge des verwertbaren Baumstückes auf dem Niveau gehalten, den es zum Zeitpunkt der Köpfung erreicht hatte. Der Massen- aber vor allem der Wertunterschied im Vergleich zum ungestört wachsenden Baum wird mit zunehmendem Alter ständig größer. Erwartungsgemäß ist die Differenz umso größer, je besser die Wuchsleistung der Bestände ist. Demgegenüber fallen die Kosten durch Faulholz am Zopf kaum ins Gewicht, da sich diese Fäulnis im weniger wertvollen Stammteil befindet und, gemessen an der gesamten Stammlänge, nur relativ geringes Ausmaß hat. Die in Abb. 6 dargestellten Werte gelten als Endwerte für beide Kostenkomponenten gemeinsam. Für betriebliche Entscheidungen sind sie entsprechend der Bestandeswertentwicklung auf das Köpfungsalter zu reduzieren (vgl. Tab. 5).

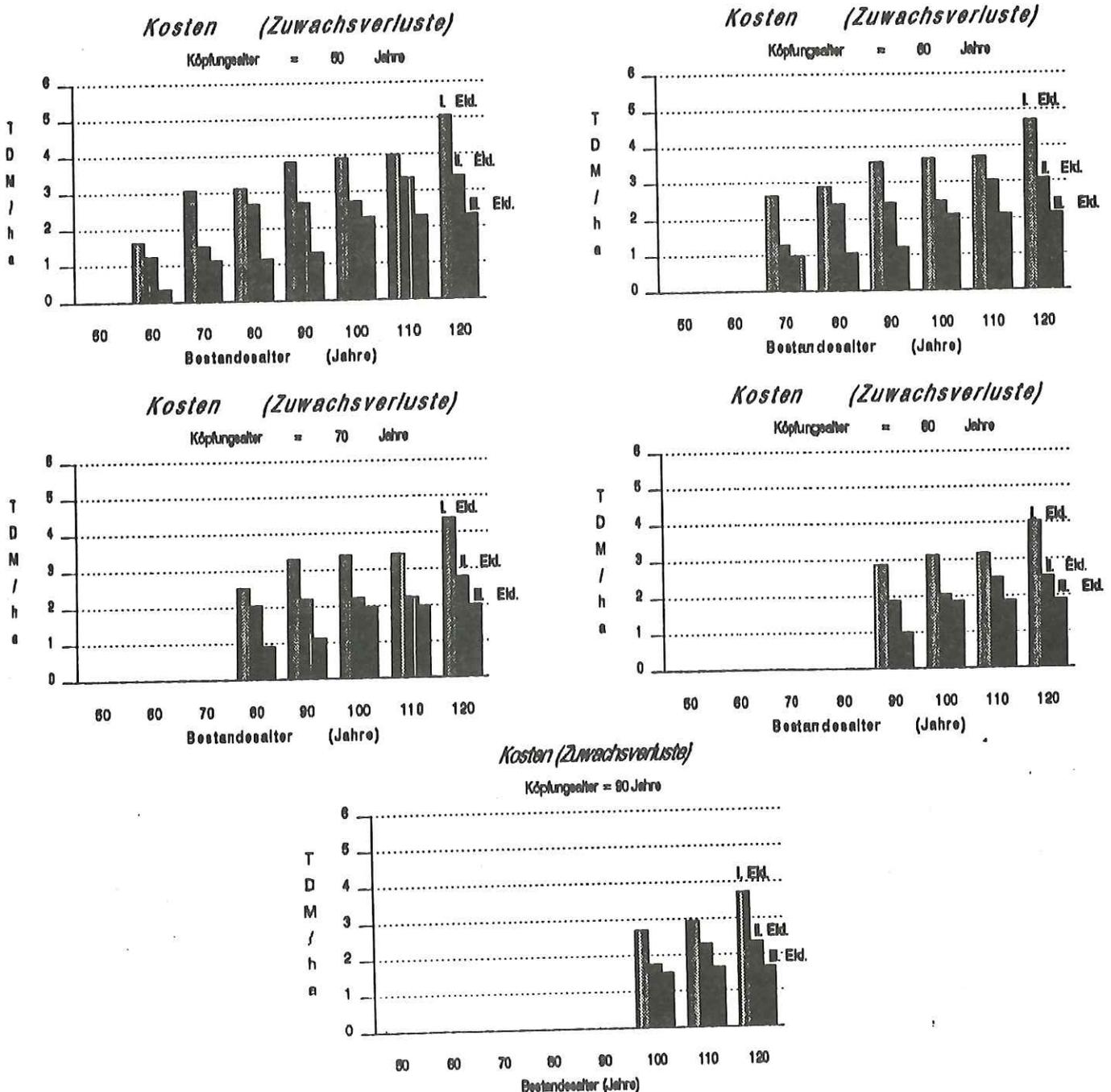
**Abb. 6:** Die Kosten durch Volumenverluste und durch Faulholz am Zopf in Abhängigkeit vom Köpfungsalter, getrennt nach Ertragsklassen.

*Costs due to volume losses and top rot, dependent on age at the time of crown topping and on yield classes*



Die Bewertung der Zuwachsverluste durch Wipfelköpfung hebt im wesentlichen darauf ab, daß zum Nutzungszeitpunkt weniger Volumen geerntet werden kann. Da von einer prozentualen Zuwachsreduktion ausgegangen wird, ist es naheliegend, daß die Kosten durch die Zuwachsminderung umso höher sind, je besser die Wuchsleistung der Bestände ist und umso wertvoller die ungeköpften Vergleichsbestände zum Nutzungszeitpunkt sind. Auch diese Kosten sind als Endwerte berechnet (vergl. Anhang Tab. 4) und sind für betriebliche Entscheidungen auf das Köpfungsalter zu reduzieren (Abb. 7).

**Abb. 7:** Die Kosten durch Zuwachsverluste, gestaffelt nach Köpfungsalter und Ertragsklassen  
*Costs due to increment losses, dependent on age at the time of crown topping and on yield classes*



Werden die einzelnen Kostenkomponenten hinsichtlich ihrer Größenordnung miteinander verglichen, so stellen die Kosten für die erstmalige Köpfung mit rund 15.000.- bis 20.000.- DM je ha Köpfungszone die größte Komponente dar. Beachtlich hoch sind die Kosten durch geköpfte Wipfelstücke und durch Faulholz, die, als Gegenwartswerte bezogen auf das Köpfungsalter von 50 Jahren, für die besten Bonitäten immerhin Werte von ca. 10.000.- bis 13.000.- DM je ha Köpfungszone erreichen können. Demgegenüber sind die Zuwachsverluste geringer anzusetzen. Sie erreichen bei der besten Bonität, ebenfalls als Gegenwartswert im Köpfungsalter von 50 Jahren berechnet, lediglich Werte um 2500.- DM/ha.

### **4.3 Entscheidungsdiagramme und Erwartungswerte**

#### **4.3.1 Entscheidungsdiagramme**

Nach der in Ziff. 3.1 erläuterten Entscheidungsregel ist eine Wipfelköpfung immer dann zu empfehlen, wenn die Leistungen die Kosten deutlich übersteigen. Nun gibt es in der Praxis eine unüberschaubare Zahl von denkbaren Entscheidungssituationen und -konstellationen. Daher wurde in Ziff. 3.1 bereits eine Reduktion auf einige wenige markante Fälle durchgeführt, um die Entscheidungsproblematik deutlicher hervortreten zu lassen. Die erheblichen Unsicherheiten bei der Prognose der Köpfungswirkungen und der Lebensdauer der zu schützenden Bestände lassen es angezeigt erscheinen, weitere Vereinfachungen vorzunehmen.

Dazu dienen **Entscheidungsdiagramme**, in denen Kosten und Leistungen für verschiedene Konstellationen enthalten sind und die die für eine Entscheidung kritischen Werte angeben. Hinsichtlich der Ausformung sowohl der zu schützenden Fläche als auch der zu köpfenden Bestandesränder gibt es in der Praxis eine Fülle von unterschiedlichen Situationen. Unter dem Gesichtspunkt einfacher Handhabung bietet sich daher der Anteil der Köpfungszonenfläche an der Gesamtfläche des zu schützenden Bestandes als Bezugsgröße an. Als Entscheidungskriterium wird der Nettonutzen je ha geschützter Fläche gewählt. Je geringer das Flächenverhältnis der

Köpfungszone zur gesamten geschützten Fläche ist, desto geringer sind die anteiligen Kosten. Damit steigt bei gleichbleibender Leistung je ha geschützter Fläche der Nettonutzen bei abnehmendem Flächenverhältnis an.

Das kritische Flächenverhältnis wird erreicht, wenn die Gerade des Nettonutzens die vorgegebene Nutzschwelle schneidet. Dabei hat der Entscheidungsträger die Möglichkeit, seine spezifischen Erfahrungen und Risikobeurteilungen einzubringen. Geht der Entscheidungsträger bei seiner Risikoabwägung davon aus, daß die Wipfelköpfung nur in der Hälfte aller Fälle wirklich erfolgreich sein wird und nur 50 % der geköpften Bestände dauerhaft gegen Sturmwurf gesichert sind, ist unter sonst gleichen Bedingungen die doppelte geschützte Fläche erforderlich, um die Nutzschwelle zu erreichen. Entsprechend ist bei einer Erfolgsquote von einem Drittel die Nutzschwelle erst bei der dreifachen Flächengröße des geschützten Bestandes erreicht. Für die Anwendung der Diagramme bedeutet dies, daß das auf der x-Achse abzulesende kritische Flächenverhältnis halbiert bzw. gedrittelt werden muß.

Wird als Entscheidungskriterium nicht der Nettonutzen je ha, sondern der absolute Nettonutzen einer Köpfungsmaßnahme gewählt, so kann dieser durch Multiplikation des aus dem Diagramm abgelesenen Nettonutzens je ha mit der Gesamtfläche ermittelt werden.

Nachfolgend werden im Anhalt an die ausgewählten Bewertungskonstellationen (Tab. 5) die einzelnen Diagramme erläutert. Dabei sind die aus den Tabellen im Anhang entnommenen Werte stets auf 100.- DM gerundet. Der Zuschlag für Nachköpfung beträgt im Durchschnitt 10 % der Köpfungskosten; im jüngeren Köpfungsalter und langer Lebensdauer werden 20 % zugeschlagen, bei höheren Köpfungsaltern und kurzer Lebensdauer dagegen erfolgt kein Zuschlag. Die Nutzschwelle (L minus K) ist auf 5.000.- DM angesetzt.

Die Bewertungskonstellationen 1 und 6, in denen sowohl geköpfter als auch ungeköpfter Bestand den planmäßigen Nutzungszeitpunkt erreichen, bzw. unmittelbar nach der Köpfung umfallen, sind trivial; es entstehen lediglich Kosten, die aus den Tabellen im Anhang einfach ermittelt werden können.

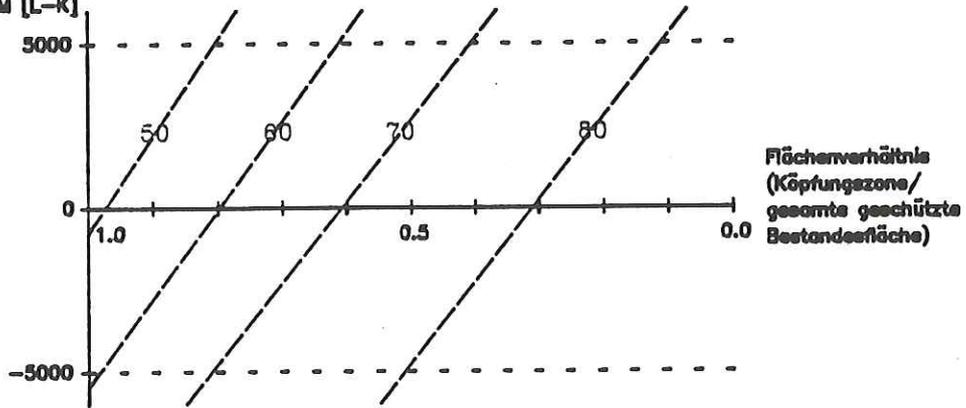
Aufschlußreicher ist Bewertungskonstellation Nr. 2 (Abb.8). Hier wird davon ausgegangen, daß der geköpfte Bestand zwar das planmäßige Nutzungsalter erreicht, jedoch ohne diese Schutzmaßnahme sogleich vom Sturm geworfen worden wäre.

Abb. 8: Entscheidungsdiagramme für Bewertungskonstellation 2:  
"Geköpfter Bestand erreicht planmäßiges Nutzungsalter; ungeköpfter Bestand wird sofort geworfen".  
Die Bezeichnung der Geraden gibt das Alter zum Zeitpunkt der Köpfung an. Die Nutzschwelle ist auf 5.000.- DM je ha angesetzt. Die planmäßige Nutzungsdauer beträgt 100 Jahre.

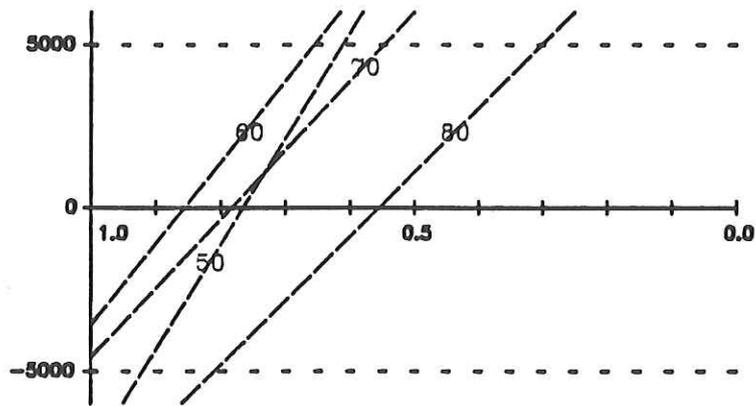
*Decision diagram for situation 2: "crown topped stand reaches normal rotation age; untopped stand is damaged immediately".  
The index of the lines gives the age at the time of crown topping. The critical value is set on 5.000.-DM/ha. Rotation age is 100 years.*

- siehe nächste Seite -

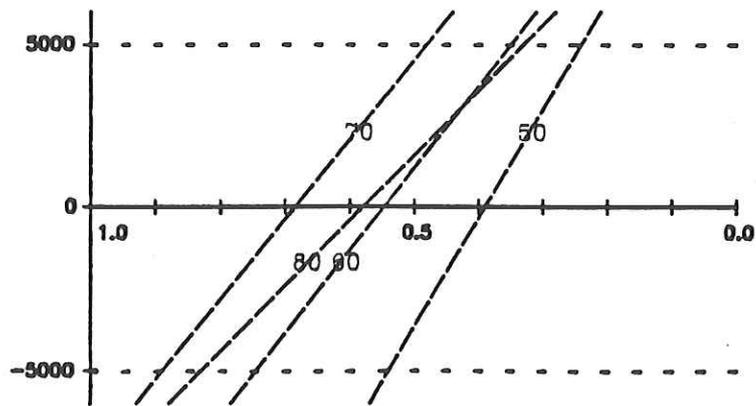
Nettonutzen der  
Wipfelk6pfung/ha  
in DM [L-K]



I. Ertragsklasse



II. Ertragsklasse



III. Ertragsklasse

Die Nutzenanwendung aus diesem Diagramm soll an einigen Beispielen erläutert werden.

#### **Beispiel 1:**

Bei einer Umtriebszeit von 100 Jahren ergibt sich für die erste Ertragsklasse bei einem Köpfungsalter von 50 Jahren ein kritisches Flächenverhältnis von 0,8, um die Nutzschwelle von 5.000.- DM je ha zu überschreiten. Bei einer Bestandeshöhe im Alter 100 von 34 m ergibt sich bei 100 m Randlänge modellhaft eine Köpfungszone von

$$h \times 100 = 0,34 \text{ ha.}$$

Somit werden bei gleicher Randlänge lediglich 0,43 ha insgesamt geschützte Fläche benötigt, um die Nutzschwelle zu erreichen.

#### **Beispiel 2:**

Für einen Bestand der ersten Ertragsklasse, der 3 ha groß ist, und der eine zu köpfende Randlänge von 150 m hat, ergibt sich bei einer Bestandeshöhe im Alter 100 von 34 m eine Köpfungszone von 0,51 ha und somit ein Flächenverhältnis von 0,17. Dem Diagramm ist bei einem Köpfungsalter von 70 Jahren ein kritisches Flächenverhältnis von 0,40 zu entnehmen; d.h. die Wipfelköpfung ist die zu bevorzugende Alternative, da das tatsächliche Flächenverhältnis geringer ist als das kritische.

#### **Beispiel 3:**

Für den gleichen Bestand (erste Ertragsklasse, 3,0 ha, 150 m Randlänge) soll unterstellt werden, daß die Köpfung mit einer Erfolgsquote von 50 % wirksam ist. Im Vergleich zur Situation des 2. Beispiels ist daher die doppelte geschützte Fläche erforderlich, um das Entscheidungsrisiko abzudecken. Das kritische Flächenverhältnis des 2. Beispiels ist daher entsprechend zu halbieren und ergibt somit 0,20.

In den bisherigen Beispielen wird als Entscheidungskriterium stets der Nettonutzen je ha geschützter Fläche unterstellt. In dem nächsten Beispiel soll die Verwendung des Entscheidungsdiagramms beschrieben werden, wenn als Entscheidungskriterium der absolute Nettonutzen einer Köpfungsmaßnahme gewählt wird.

#### **Beispiel 4:**

Für den Bestand des Beispiels 2 läßt sich aus dem Diagramm bei einem tatsächlichen Flächenverhältnis von 0,17 ein Nettonutzen je ha von 10.700.- DM entnehmen. Dies bedeutet für die unterstellte Gesamtbestandesfläche von 3 ha einen absoluten Nettonutzen von rund 32.100.- DM.

**Bewertungskonstellation 3** geht davon aus, daß der geköpfte Bestand den planmäßigen Nutzungszeitpunkt erreicht, der ungeköpfte Bestand jedoch ebenfalls eine gewisse Zeit stehen bleibt, bevor er dem Sturm zum Opfer fällt. In diesem Fall bleiben zwar die Kosten der Wipfelköpfung auf gleicher Höhe wie bei Konstellation 2, die Leistung ist jedoch geringer. Dieser Unterschied wird umso deutlicher, je besser die Bonität des Bestandes ist. Das kritische Flächenverhältnis ist in der Regel in Richtung auf kleinere Relationen verschoben; d.h. die Nutzschwelle wird bei im übrigen gleichen Verhältnissen erst bei einer größeren geschützten Fläche erreicht. Die Anwendung des entsprechenden Entscheidungsdiagramms (Abb. 9), das ebenfalls für eine planmäßige Nutzungsdauer von 100 Jahren berechnet ist, entspricht dem bereits erläuterten Diagramm (Abb. 8).

Ein für die Entscheidungspraxis durchaus nicht ungewöhnlicher Fall ist die **Bewertungskonstellation 4**. Hierbei wird unterstellt, daß der ungeköpfte Bestand zum Köpfungszeitpunkt vom Wind geworfen wird, der geköpfte Bestand jedoch ebenfalls nicht den planmäßigen Nutzungszeitpunkt erreicht. Die Kosten der Wipfelköpfung werden dadurch, verglichen mit der Konstellation 2, etwas geringer; die Leistung sinkt jedoch ebenfalls ab, sodaß sich in der Regel über alle Bonitäten hinweg eine Verschiebung des kritischen Flächenverhältnisses in Richtung auf geringere Werte ergibt.

Auch für das in Abbildung 10 dargestellte Entscheidungsdiagramm, das für eine planmäßige Umtriebszeit von 100 Jahren konstruiert ist, gelten die Anwendungsbeispiele analog. Als Eingangsgrößen werden wie in den vorausgehenden Diagrammen die Bonität und das Köpfungsalter verwendet. Als zusätzliche Information wird die Lebensdauer des geköpften Bestandes benötigt.

**Abb. 9:** Entscheidungsdiagramm für Bewertungskonstellation 3: "Geköpfter Bestand erreicht planmäßiges Nutzungsalter; ungeköpfter Bestand bleibt einige Jahre stehen, bevor er geworfen wird".

Die Bezeichnung der Geraden setzt sich zusammen aus:

1. Zahl: Alter zum Zeitpunkt der Köpfung
2. Zahl: Lebensdauer des ungeköpften Bestandes

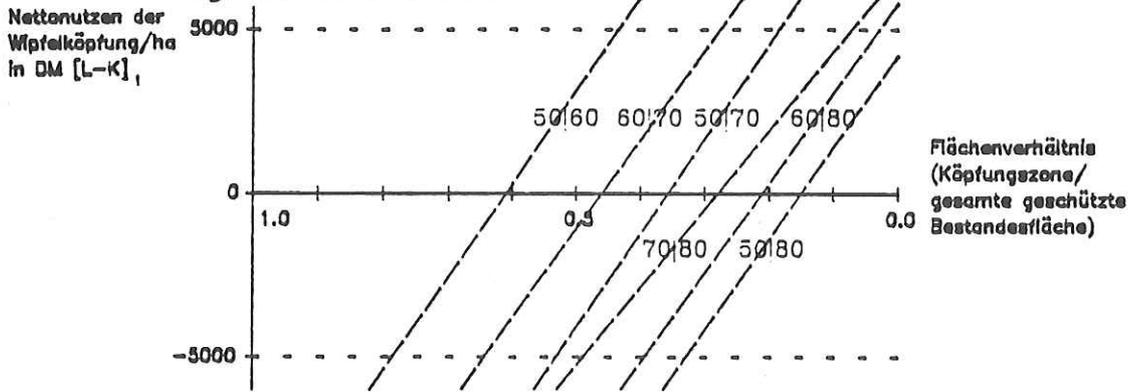
Die Nutzwelle ist auf 5.000.- DM je ha angesetzt. Planmäßige Nutzungsdauer beträgt 100 Jahre.

*Decision diagram for situation 3: "topped stand reaches rotation age; untopped stand survives a period of time before being damaged".*

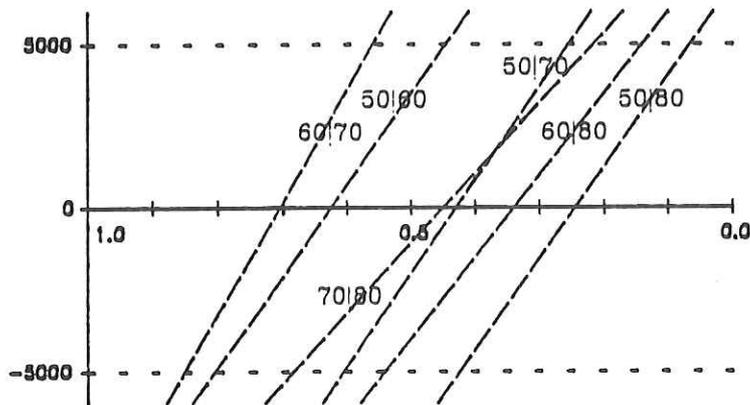
*The lines are signed as follows:*

1. number: age at the time of crown topping
2. number: age when the untopped stand is damaged

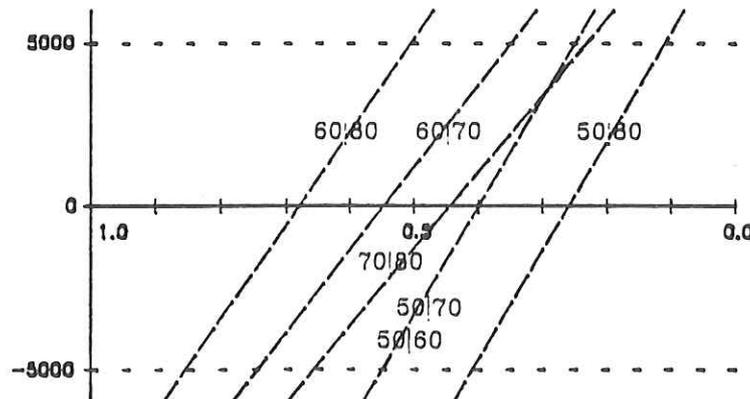
*The critical value is set on 5.000.- DM/ha. Rotation age is 100 years.*



I. Ertragsklasse



II. Ertragsklasse



III. Ertragsklasse

**Abb. 10:** Entscheidungsdiagramm für Bewertungskonstellation 4: "Geköpfter Bestand erreicht nicht das planmäßige Nutzungsalter; ungeköpfter Bestand wird im Köpfungsalter geworfen".

Die Bezeichnung der Geraden setzt sich zusammen aus:

1. Zahl: Alter zum Zeitpunkt der Köpfung
2. Zahl: erreichtes Alter des geköpften Bestandes

Die Nutzschwelle ist auf 5.000.- DM je ha angesetzt.

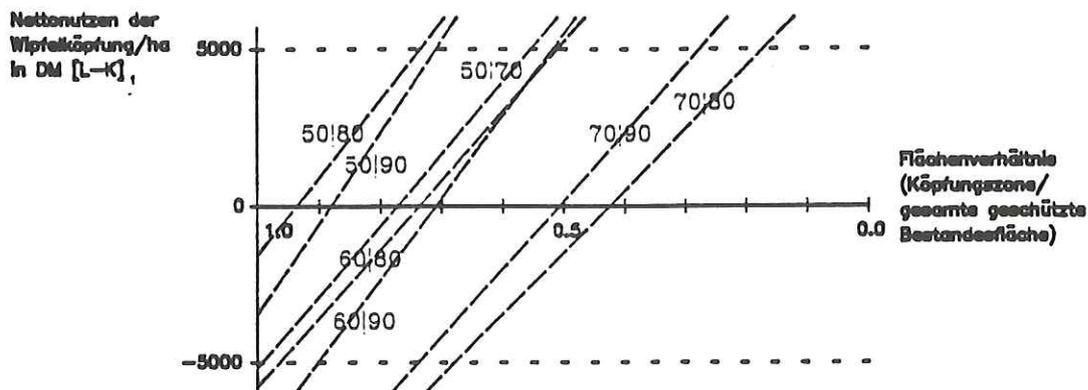
Die planmäßige Nutzungsdauer beträgt 100 Jahre.

*Decision diagram for situation 4: "topped stand does not reach rotation age; untopped stand is damaged immediately".*

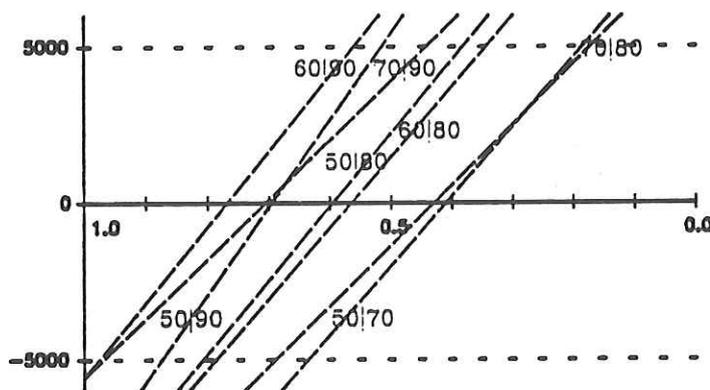
*The lines are signed as follows:*

1. number: age at the time of crown topping
2. number: age when the topped stand is damaged

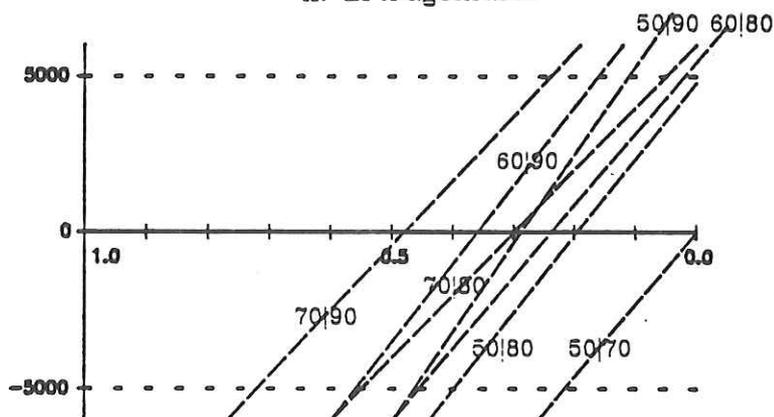
*The critical value is set on 5.000.- DM/ha. Rotation age is 100 years.*



I. Ertragsklasse



II. Ertragsklasse



III. Ertragsklasse

Schließlich ist **Bewertungskonstellation 5** eine Kombination aus Elementen der Fälle 3 und 4: der geköpfte Bestand erreicht nicht den planmäßigen Nutzungszeitpunkt und der ungeköpfte Bestand bleibt über den Entscheidungszeitpunkt hinaus eine Reihe von Jahren erhalten. Gegenüber dem vorausgehend erörterten Fall 4 bedeutet dies, daß bei gleichen Kosten geringere Leistungen durch die Wipfelköpfung erbracht werden. Das kritische Flächenverhältnis zwischen Köpfungszone und Gesamtbestand wird kleiner; d.h. bei gleicher Fläche der Köpfungszone wird die Nutzschwelle erst bei größeren Bestandesflächen erreicht.

#### 4.3.2 Erwartungswerte des Nettonutzens

Die Risikoeinschätzung ist eines der Kernprobleme bei der betriebswirtschaftlichen Beurteilung der Wipfelköpfung. Nach den vorliegenden Untersuchungen (vergl. HEUPEL et al. im gleichen Heft) wird davon auszugehen sein, daß die Wipfelköpfung lediglich in einem gewissen Prozentsatz aller Fälle den Bestand erfolgreich schützt. Zur sicheren Prognose der Wirksamkeit einer Wipfelköpfung unter bestimmten standörtlichen und bestandesspezifischen Bedingungen reicht das verfügbare Datenmaterial jedoch nicht aus.

In einer solchen Entscheidungssituation, die durch ein hohes Maß an Unsicherheit bezüglich künftiger Ereignisse gekennzeichnet ist, sollte der Entscheidungsträger die Sensibilität seiner Entscheidung auf die unterstellten Annahmen überprüfen. Ein grober Rahmen, in dem sich die möglichen betriebswirtschaftlichen Ergebnisse bewegen können, läßt sich durch Überprüfung von optimistischen, mittleren und pessimistischen Annahmen abstecken. Dies soll an einem **Beispiel** erläutert werden:

Ein 50-jähriger Bestand erster Ertragsklasse mit einer Gesamtfläche von 3 ha soll auf einer Zone von 0,6 ha geköpft werden. Daraus ergibt sich ein Verhältnis der Köpfungszone zur gesamten Bestandesfläche von 0,2. Es sollen nun folgende Annahmen geprüft werden:

- a) optimistisch: der Bestand bleibt bis zur Umtriebszeit von 100 Jahren erhalten; ohne Köpfung würde er sofort geworfen.
- b) mittel: der Bestand bleibt bis zum Alter 80 erhalten; ohne Köpfung würde er sofort geworfen.

c) pessimistisch: die Köpfung ist wirkungslos; d.h. der Bestand wird trotz der Köpfung unmittelbar geworfen.

Aus den Tabellen im Anhang lassen sich die Nettonutzen je ha für die unterschiedlichen Annahmen errechnen. Der Gesamtnutzen, als ein weiteres Entscheidungskriterium, ergibt sich aus den Nettonutzen je ha durch Multiplikation mit der Bestandesfläche. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Tabelle 7, Spalte 5 und 6, dargestellt.

Tab. 7: Ermittlung des Ergebnisrahmens und der Erwartungswerte des Nettonutzens (je ha und insgesamt)

*Frame of possible results and expected values of net benefit (per ha and total)*

Zeile	Variante	erreichtes Alter		Nettonutzen je ha (n <sub>i</sub> ) - DM -	Gesamtnettonutzen (N <sub>i</sub> ) - DM -	Wahrscheinlichkeit (p <sub>i</sub> )	gewogener Nettonutzen (p <sub>i</sub> x n <sub>i</sub> ) - DM -
		ungeköpft	geköpft				
		- Jahre -					
1	2	3	4	5	6	7	8
1	optimistisch	50	100	22.200	66.600	0,3	6.660
2	mittel	50	80	18.400	55.200	0,4	7.360
3	pessimistisch	50	50	- 3.760	- 11.300	0,3	- 1.130
Erwartungswert je ha							12.890
Insgesamt							38.670

Der prognostizierte Gesamtnutzen der Köpfungsmaßnahme (Spalte 6) reicht von rd. 67.000.- DM im günstigsten Fall bis zu rund minus 12.000.- DM bei pessimistischer Einschätzung. Der Entscheidungsträger sollte daher angesichts des außerordentlich weitgespannten Rahmens der möglichen Ergebnisse Klarheit darüber schaffen, für wie wahrscheinlich er die einzelnen Varianten hält. Mit anderen Worten: Er muß an dieser Stelle seine Risikoeinschätzung offen legen und begründen.

Tabelle 7 gibt in Spalte 7 beispielhaft das Ergebnis einer solchen Risikoabwägung wieder. Optimistische und pessimistische Variante werden als gleichwahrscheinlich eingeschätzt. Die mittlere Variante erscheint am wahrscheinlichsten. Die sich ergebenden Erwartungswerte liegen deutlich im positiven Bereich und übersteigen eine angenommene Nutzenschwelle von 5.000.- DM bei weitem. Unter den spezifischen Annahmen des Beispiels, sowohl bezüglich der Einschätzung möglicher Folgen als auch hinsichtlich der getroffenen Risikoabwägung, erscheint eine Wipfelköpfung daher empfehlenswert.

Im konkreten Entscheidungsfall müssen örtliche Erfahrungen oder solche aus ähnlich gelagerten Situationen herangezogen werden. Sofern keine örtlichen Erfahrungen vorliegen, können näherungsweise die Werte aus Tab. 8 (Ziff. 5) zur Risikoabschätzung verwendet werden.

## 5. DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNG

Entscheidungen über Wipfelköpfungen sind besonders gekennzeichnet durch ein hohes Maß an Unsicherheit. Diese Unsicherheit bezieht sich sowohl auf die Einschätzung der weiteren Entwicklung des geköpften Bestandes als auch auf die Beurteilung der Lebensdauer des gleichen Bestandes ohne Köpfung. Erst die Gegenüberstellung beider Entwicklungen erlaubt jedoch ein Urteil über den wirtschaftlichen Nutzen einer Köpfungsmaßnahme. Die Fülle denkbarer Entwicklungen läßt das Entscheidungsproblem sehr unübersichtlich werden. In der Praxis führt dies unter Umständen dazu, daß Entscheidungen ohne gründliche ökonomische Analyse und ohne nachvollziehbare Begründung getroffen werden. Eine solche Situation läßt es daher angezeigt erscheinen, anhand von Modellen die Vielfalt der Wirklichkeit zu reduzieren und damit überschaubar zu machen.

In der vorliegenden Untersuchung wird davon ausgegangen, daß die zu köpfenden Bestände in ihrer Struktur und in ihrem Wachstum mit der Ertragstafel Wiedemann für mäßige Durchforstung übereinstimmen. Abweichende Bestandesbehandlungen, etwa im Sinne einer frühzeitigen Stammzahlreduktion in Verbindung mit einer anschließenden Auslesedurchforstung, haben einen erheblichen Einfluß auf die Sorten- und Wertstruktur der Bestände und führen zu erheblichen Abweichungen von der Ertragstafel. Dies schränkt zwar die unmittelbare Anwendung der vorliegenden Modelle auf abweichende Behandlungen ein. Jedoch dürften die Ergebnisse, wenn auch nicht in ihrer absoluten Höhe, so doch in ihrer Tendenz auch für abweichende Bestandesstrukturen zutreffen, da die Wertunterschiede zwischen geköpften und ungeköpften Beständen vermutlich gleich gerichtet sind.

Ähnlich ist die Tatsache zu werten, daß alle Überlegungen von vollbestockten Beständen ausgehen. Abgesenkte Bestockungsgrade ändern an den in den Diagrammen erläuterten grundsätzlichen Tendenzen nichts.

Das Bewertungsmodell schließt an die klassischen Verfahren der Bestandesbewertung an. Dabei werden künftige Erträge, aber auch künftige Kosten, entsprechend der Bestandeswertentwicklung auf den jeweiligen Gegenwartswert reduziert. Denkbar ist allerdings auch ein Bewertungsansatz, der von einer bestimmten Zinsforderung für die anfallenden Kosten ausgeht und somit finanzmathematisch mit diskontierten Beträgen arbeitet. In der vorliegenden Untersuchung wurde bewußt auf solche Überlegungen verzichtet, da die künftigen Kosten der Wipfelköpfung als Ertragseinbußen der geköpften Bestandesteile aufscheinen. Ein solcher Ansatz birgt die Gefahr in sich, daß die Leistungen einer Wipfelköpfung mit einer anderen Zeitpräferenz und damit einer anderen Verzinsung versehen werden als die Kosten. Damit wird ein solches Modell in sich widersprüchlich.

Die vorliegende entscheidungsorientierte Betrachtung der Wipfelköpfung geht von einer überschaubaren Zahl von 6 unterschiedlichen Entscheidungskonstellationen aus. Kennzeichnend für diese Differenzierung ist die Lebensdauer des geköpften sowie des (fiktiven) ungeköpften Bestandes. Der maximale Effekt der Wipfelköpfung tritt ein, wenn der ungeköpfte Bestand sofort vom Sturm geworfen wird, der geköpfte Bestand jedoch das Alter der Umtriebszeit erreicht. Das größte negative Ergebnis einer Wipfelköpfung ergibt sich, wenn sowohl ungeköpfter wie auch geköpfter Bestand die planmäßige Produktionszeit erreichen. Zwischen beiden Extremen sind die Ergebnisse der übrigen 4 Konstellationen anzusiedeln.

Die Entscheidung über eine Wipfelköpfung ist zweiwertig; d.h. es bieten sich lediglich zwei alternative Möglichkeiten: "Köpfen" oder "Nichtköpfen". Bei solchen zweiwertigen Entscheidungen gibt es, bezogen auf ein vorgegebenes Entscheidungskriterium, einen Schwellenwert, bei dessen Über- oder Unterschreitung die Entscheidung umschlägt. Dieser Wert wird gemeinhin als **kritischer Wert** bezeichnet. Als griffiges Entscheidungskriterium bietet sich der Nettonutzen an. Daher gilt in dieser Untersuchung die Entscheidungsregel, daß eine Wipfelköpfung immer dann erfolgen soll, wenn ihr Nutzen deutlich über den Kosten liegt.

Von ausschlaggebender Bedeutung für die Höhe des erzielbaren Nettonutzens der Wipfelköpfung ist das Flächenverhältnis von Köpfungszone zum geschützten Gesamtbestand. Als Hilfsmittel für die Praxis sind daher für die wichtigsten Konstellationen Entscheidungsdiagramme entwickelt, aus denen in Abhängigkeit von einer vorgegebenen Nutzschwelle in Höhe von 5.000.- DM je ha kritische Werte für dieses Flächenverhältnis abgelesen werden können.

Aus den Entscheidungsdiagrammen lassen sich einige generelle Empfehlungen ableiten.

1. In fast allen untersuchten Fällen, in denen die Wipfelköpfung als erfolgswirksam unterstellt ist (d.h. Konstellationen 2 bis 5) wird die Nutzschwelle bei einem Flächenverhältnis oberhalb von 0,2 erreicht. Daraus ergibt sich der Hinweis, daß die zu schützenden Bestände eine durchschnittliche Tiefe von 150 bis 200 m haben sollten, sofern mit einer Wirkungsdauer der Köpfung gegenüber ungeköpften Beständen von mindestens 20 Jahren gerechnet werden kann.
2. Bei der besten Bonität wird unter sonst gleichen Bedingungen der größte Nettonutzen in Beständen bei einem Köpfungszeitpunkt zwischen 50 und 60 Jahren erzielt; bei der geringsten Bonität liegt dieser Zeitpunkt in höherem Alter, etwa bei 70 Jahren. Allerdings liegt der Nettonutzen bei den geringsten Bonitäten auf deutlich niedrigerem Niveau.
3. Die wirtschaftliche Ergiebigkeit der Wipfelköpfung sinkt bei guten Bonitäten mit zunehmendem Alter rasch ab. Bei geringen Bonitäten steigt sie jedoch etwa bis zum Alter 70 an. Unter diesem Aspekt kann es auch zweckmäßig sein, für geringe Bonitäten die Umtriebszeit über 100 Jahre hinaus anzuheben, um den Wertzuwachs des gesicherten Bestandes voll auszuschöpfen.

Die Höhe des Nettonutzens wird ganz entscheidend von der Wirkungsdauer der Wipfelköpfung geprägt. Der Entscheidung über eine Wipfelköpfung muß daher eine gründliche Prüfung und Abschätzung des bestehenden Windwurfrisikos vorangehen. Da eine sichere Prognose in der Regel nicht möglich ist, wird die Ermittlung von Er-

wartungswerten des Nettonutzens empfohlen. Das in Abschnitt 4.3.2 beschriebene Verfahren zwingt den Entscheidungsträger dazu, die Risikoeinschätzung offenzulegen und zu begründen.

Eine solche Einschätzung kann sich auf die Ergebnisse der Untersuchung von HEUPEL et al. (im gleichen Heft) stützen. So ist bei der Risikoabschätzung für staunasse Böden die Beobachtung hilfreich, daß etwa die Hälfte der Bestände die Köpfung nur kurze Zeit überdauerten. Diese Quote steigt bei älteren Beständen auf 60 % an. Auf den stabileren, nicht stau- oder grundwasserbeeinflußten Standorten der Grundform  $\leq$  VII (Stauhorizont tiefer als 65 cm unter der Mineralbodenoberfläche) liegt der entsprechende Anteil bei 20 %, wobei ebenfalls bei älteren Beständen ein Trend zu höheren Quoten erkennbar ist.

Schließlich belegt das Datenmaterial, daß die Wipfelköpfung im Untersuchungsgebiet nicht ausreichte, um das Windwurfrisiko der behandelten Bestände auf das Niveau der zum Vergleich herangezogenen übrigen Bestände herabzudrücken. Dies weist einerseits auf das besondere Gefährdungspotential der zur Köpfung ausgewählten Bestände hin. Andererseits kann eine durchschlagende stabilisierende Wirkung der Wipfelköpfung mit den Daten nicht belegt werden. Das Datenmaterial bietet allerdings kaum Anhaltspunkte für eine sichere Einschätzung der langfristigen Wirkung einer Wipfelköpfung. Der ganz überwiegende Teil der Köpfungen liegt nämlich nicht länger als 20 Jahre zurück. Kontinuierlich, wenn auch mit abnehmender Frequenz, scheiden geköpfte Bestände aus. Ein Zeitpunkt, ab dem die geköpften Bestände als absolut standfest gelten können, ist nicht zu erkennen. Daher ist anzunehmen, daß geköpfte Bestände nicht selten zwar 20-30 Jahre die Köpfung überdauern, die planmäßige Umtriebszeit jedoch nicht erreichen.

Mit allen Vorbehalten hinsichtlich einer allgemeingültigen Einschätzung soll nachfolgend versucht werden, diese konkreten Ergebnisse zur Risikobeurteilung heranzuziehen und modellhaft in entsprechende Wahrscheinlichkeiten umzusetzen (Tab. 8). Dabei erscheint es zweckmäßig, staunasse und stabile Standorte getrennt zu behandeln.

Tab. 8: Wahrscheinlichkeiten für die Wirksamkeit von Wipfelköpfungen und resultierender Nettonutzen  
*Probability of efficiency of crown topping and resulting net benefit*

Varianten	Köpfungszeitpunkt (Alter)	Lebenserwartung		Stauanasse Standorte			Standorte ohne Stauanasse			
		ungeköpfter Bestand	geköpfter Bestand	Wahrscheinlichkeit	Nettonutzen/ha gewichtet		Wahrscheinlichkeit	Nettonutzen/ha gewichtet		
					I.Bon.	II.Bon.		I.	II.	III.
1	40	40	100	0,15			0,225			
2		40	70	0,20			0,20			
3		60	100	0,10			0,175			
4		40	40	0,50			0,20			
5		100	100	0,05	6720	4293	0,20	9630	6821	2268
1	50	50	100	0,10			0,175			
2		50	80	0,20			0,20			
3		70	100	0,10			0,175			
4		50	50	0,55			0,25			
5		100	100	0,05	4664	2742	0,20	7020	4850	1675
1	60	60	100	0,075			0,15			
2		60	80	0,175			0,175			
3		70	100	0,075			0,175			
4		60	60	0,625			0,30			
5		100	100	0,05	1842	1869	0,20	4253	4590	2365
1	70	70	100	0,05			0,15			
2		70	80	0,15			0,15			
3		80	100	0,05			0,15			
4		70	70	0,70			0,35			
5		100	100	0,05	- 718	- 241	0,20	913	2161	2123

Fünf unterschiedliche Situationen werden betrachtet:

Die erste optimistische Einschätzung geht davon aus, daß die geköpften Bestände die Umtriebszeit erreichen, während die ungeköpften unmittelbar vom Sturm geworfen werden. Die Wahrscheinlichkeit für das Überdauern der geköpften Bestände nimmt mit dem Köpfungsalter ab und ist auf den stabilen Standorten deutlich höher.

Die nächste Variante geht davon aus, daß die ungeköpften Bestände sofort geworfen werden, die geköpften jedoch auch die Umtriebszeit nicht erreichen. Die Wahrscheinlichkeit ist auf beiden Standortgruppen gleich und nimmt mit dem Alter ab.

Variante 3 sieht vor, daß die geköpften Bestände zwar die Umtriebszeit erreichen, die ungeköpften jedoch auch noch eine zeitlang stehen bleiben. Die Wahrscheinlichkeit nimmt im höheren Alter ab und ist auf den staunassen Standorten erheblich geringer als auf Standorten ohne Staunässe.

Bei der vierten Variante bleibt die Köpfung ohne Wirkung, weil die geköpften Bestände unmittelbar vom Sturm geworfen werden. Die Wahrscheinlichkeiten können mit Hilfe der bereits erwähnten Prozentsätze geworfener Bestände aus der Erhebung eingeschätzt werden. Sie zeigen einen deutlichen Alterstrend.

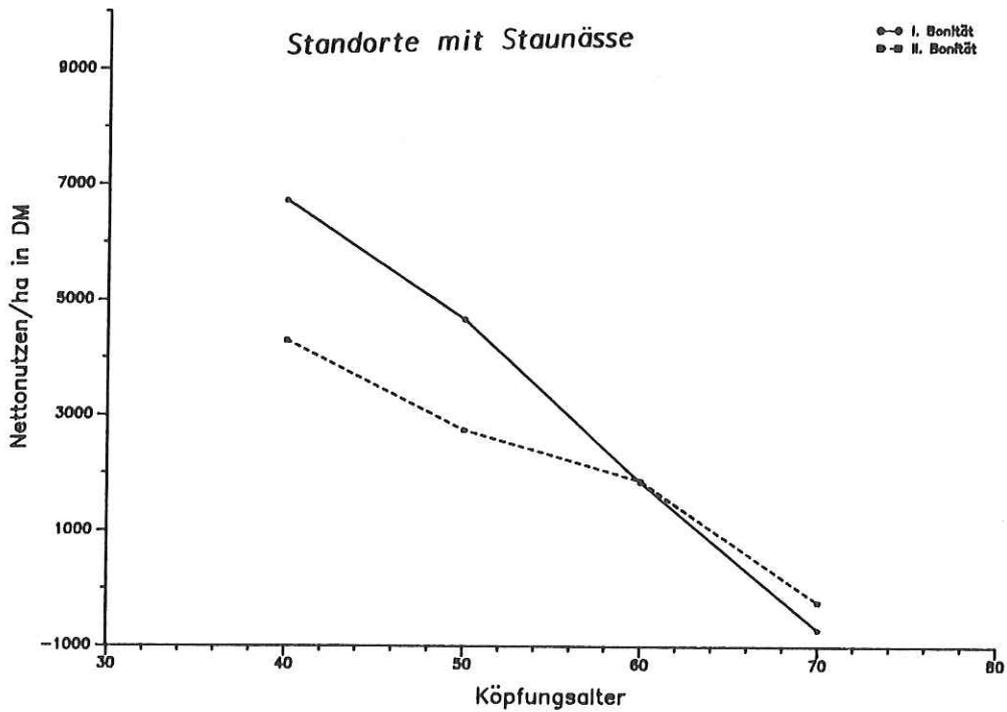
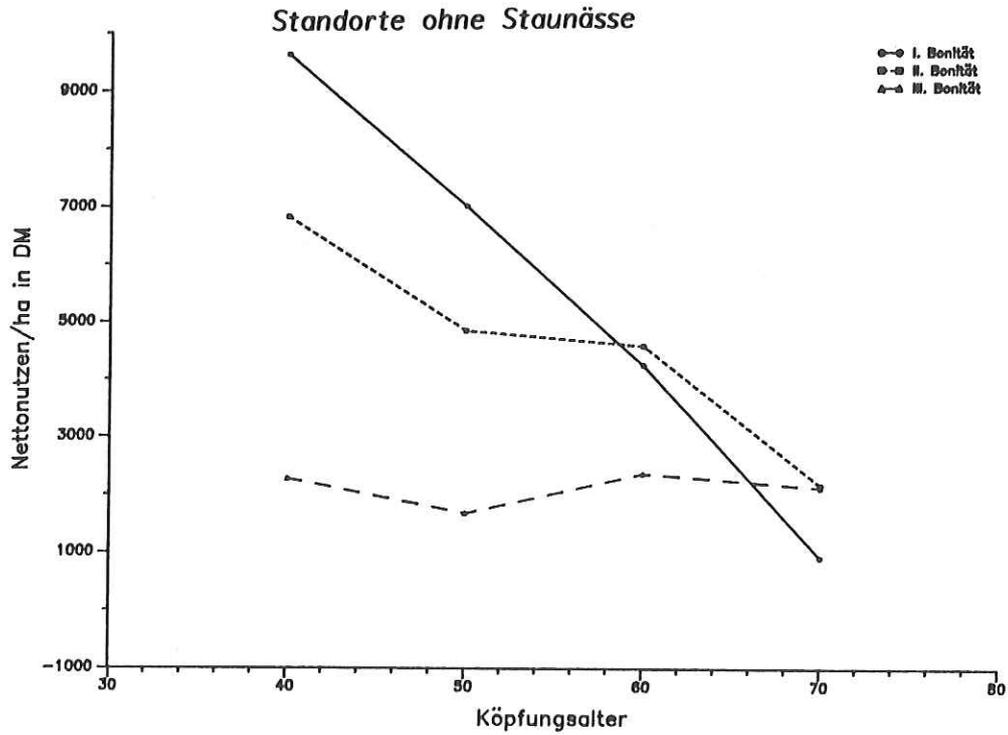
Schließlich gibt es einen Anteil von Beständen, der auch ohne Köpfung das Umtriebsalter erreicht. Dieser Anteil dürfte auf den staunassen Standorten sehr gering sein; auf den stabilen Standorten wird dieser Fall als durchaus wahrscheinlich angesehen.

Auf der Grundlage dieser Annahmen werden nun Erwartungswerte für die Wirkung der Wipfelköpfung berechnet. Dabei wird die in der genannten Untersuchung ermittelte durchschnittliche Bestandestiefe der geköpften Bestände von 220 m unterstellt. Wegen der allgemein wüchsigen Bestände auf staunassen Standorten wird dort auf die Betrachtung der dritten Bonität verzichtet. Für die Werte im Köpfungsalter von 40 Jahren werden die entsprechenden Werte für 50 Jahre aus den Tabellen im Anhang entnommen. Die Ergebnisse sind in Abb. 11 als Nettonutzen je ha dargestellt.

Wie der Abb. 11 zu entnehmen ist, fallen die Nutzenkurven auf staunassen Böden rasch ab, wobei die zweite Bonität erwartungsgemäß auf niedrigerem Niveau verläuft. Im Köpfungsalter von 70 Jahren unterschreitet der Nettonutzen die absolute Nutzwelle und wird negativ.

Auf den stabilen Standorten finden wir eine in der Tendenz ähnliche Situation. Allerdings bleibt der Nettonutzen stets im positiven Bereich. Kennzeichnend für die dritte Bonität ist, daß hier der Nettonutzen im Köpfungsalter 70 höher ist als bei den besseren Bonitäten (vgl. Abb. 11).

**Abb. 11:** Entwicklung der Nettonutzen bei unterschiedlichen K pfungsaltern, getrennt nach Standorten mit und ohne Staunässe  
*Development of netbenefit over topping ages, separately for sites with and without stagnant moisture*



Wipfelköpfungen sind erheblich kostenträchtige Maßnahmen. Die vorstehenden Überlegungen sollen daher dazu anregen, Entscheidungen über konkrete Wipfelköpfungen in ähnlicher Weise systematisch vorzubereiten. Dabei müssen selbstverständlich weitere Überlegungen und Entscheidungskriterien im Einzelfall herangezogen werden. So sollten Fragen der Arbeitskapazität und der Marktlage sowie fällige Folgekosten des Windwurfs in den Abwägungsprozeß einbezogen werden. Ziel sollte indes stets sein, die Entscheidungsgrundlagen gründlich zu analysieren und die Entscheidung in einem kritisch-analytischen Prozeß abzuleiten.

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

Sturmbedingte Schäden betreffen sämtliche möglichen Zielelemente eines Forstbetriebs, von der Sachgüterproduktion über Sicherheits- und monetäre Ziele bis hin zu den Dienstleistungszielen, und wirken in unterschiedlichem Maße mindernd auf die Zielerfüllung.

Angesichts dieser vielfältigen möglichen Auswirkungen von Sturmschäden und der Vielzahl betroffener Zielelemente ist es außerordentlich schwierig, diese Einflüsse zutreffend zu beschreiben und treffsicher zu prognostizieren. Diese verwirrende Vielfalt kann in der Praxis dazu führen, daß kostenträchtige Entscheidungen über Sturmsicherungsmaßnahmen ohne gründliche ökonomische Analyse und ohne nachvollziehbare Begründung getroffen werden. Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es daher, betriebswirtschaftliche Entscheidungshilfen für die Beurteilung einer geplanten Wipfelköpfung zu erarbeiten und für die Praxis bereitzustellen.

Als Voraussetzungen und Kriterien für die Zweckmäßigkeit von Wipfelköpfungen werden herausgestellt:

- standörtliche Bedingungen: Sturmgefährdung (Staunässe, Exposition), Wasser- und Nährstoffangebot
- bestandesbezogene Voraussetzungen: Höhe des Bestandes, relative Kronenlänge, Tiefe der Köpfungszone, Größe der geschützten Bestandesfläche

- Kosten der Wipfelköpfung: erstmalige Durchführung, Nachköpfung, Verluste durch stagnierende Höhenentwicklung in der Köpfungszone, rotfaule Zopfstücke, Zuwachsverluste, sonstige Schäden
- Leistungen der Wipfelköpfung: Vermeidung direkter und indirekter Schäden.

Sturmschäden weisen alle Merkmale betrieblicher Risikolagen auf; sie stellen ein Gefährdungspotential dar, dessen Eintreten hinsichtlich Zeitpunkt und Ausmaß ungewiß ist, und das in der Regel mit betrieblichen Maßnahmen nicht oder nur unzureichend gesteuert werden kann.

Zum Zeitpunkt einer Entscheidung über Wipfelköpfungen liegt die ganz überwiegende Zahl relevanter Kosten- und Leistungsgrößen nicht als aktuelle betriebliche Werte vor, sondern muß prognostiziert werden. Aufgrund der dadurch bedingten Unwägbarkeiten und wegen der Vielfalt relevanter Einflußgrößen ist es für den Zweck dieser Arbeit angemessen, die vielfältigen Faktoren auf eine überschaubare Zahl kosten- und leistungsrelevanter Größen zu reduzieren und in einem Erklärungsmodell wertend zusammenzufassen. Daher wird die Betrachtung auf die direkten Sturmwirkungen beschränkt und auf monetäre Zielelemente konzentriert.

Die Wirtschaftlichkeit einer Wipfelköpfung wird durch die Gegenüberstellung der beiden unterschiedlichen Güterlagen mit bzw. ohne Wipfelköpfungen ermittelt. Dabei ist das Ergebnis dieser Bewertung sowohl auf der Kosten- als auch auf der Leistungsseite außerordentlich stark geprägt von der Zeitdauer, um die ein geköpfter Bestand länger überlebt als ein entsprechender ungeköpfter.

Je nach der Lebensdauer sowohl des geköpften als auch des ungeköpften Bestandes werden 6 Bewertungs- und Entscheidungskonstellationen unterschieden. Im Anhalt an das klassische Verfahren der Bestandeswertermittlung werden die einzelnen Kosten- und Leistungskomponenten für diese 6 Konstellationen formelmäßig dargestellt. Als Entscheidungskriterium für die Vorteilhaftigkeit ei-

ner Wipfelköpfung wird der Nettonutzen gewählt. Als Entscheidungsregel wird gefordert, daß die Leistungen die Kosten deutlich übersteigen müssen:

$$L \gg K$$

Zur Beschreibung der Modellbestände dient die Ertragstafel Wiedemann für mäßige Durchforstung. Die Bewertung erfolgt auf dem Kosten- und Preisniveau von 1988. Die Kosten für die Durchführung der Wipfelköpfung beruhen auf einer Umfrage bei einschlägigen Unternehmen. Die köpfungsbedingten Holzmassenverluste werden als Differenz zwischen den Abtriebswerten des geköpften und des ungeköpften Vergleichsbestandes berechnet. Zur Ermittlung der köpfungsbedingten Zuwachsminderungen in der Köpfungszone wird auf die verminderte Nettofotosyntheserate abgestellt. Die Eindringtiefe einer köpfungsbedingten Zopffäule wird in konstanter Länge von 2,5 m unterstellt.

Die Ergebnisse der umfangreichen Berechnungen sind in 4 Tabellen im Anhang zusammengefaßt.

Bei im übrigen gleichen Eingangsgrößen ist der Nettonutzen einer Wipfelköpfung linear abhängig von dem Größenverhältnis von Köpfungszone zur gesamten Bestandesfläche. Die Ergebnisse für die wichtigsten Bewertungskonstellationen werden daher in Abhängigkeit von diesem Flächenverhältnis als Entscheidungsdiagramme dargestellt. Aus diesen Diagrammen können die kritischen Flächenverhältnisse abgelesen werden, bei denen der Nettonutzen einer Wipfelköpfung eine vorgegebene Nutzschwelle erreicht.

Aus den Entscheidungsdiagrammen lassen sich einige generelle Empfehlungen ableiten:

- a) Die zu schützenden Bestände sollten eine durchschnittliche Tiefe von 150 - 200 m aufweisen, sofern mit einer Wirkungsdauer der Wipfelköpfung gegenüber ungeköpften Vergleichsbeständen von mindestens 20 Jahren gerechnet werden kann.

- b) Bei den besten Bonitäten wird der günstigste ökonomische Effekt bei einem Köpfungsalter zwischen 50 und 60 Jahren erzielt. Bei den geringeren Bonitäten liegt dieser Zeitpunkt etwas später, etwa bei 70 Jahren.
- c) Die wirtschaftliche Ergiebigkeit der Wipfelköpfung sinkt bei den besten Bonitäten mit zunehmendem Alter rasch ab. Bei den geringen Bonitäten steigt sie etwa bis zum Alter 70 an. Daher erscheint es zweckmäßig, bei geringen Bonitäten die Umtriebszeit über 100 Jahre hinaus anzuheben, um den Wertzuwachs des gesicherten Bestandes voll auszuschöpfen.

Der Entscheidung über eine Wipfelköpfung muß eine gründliche Prüfung und Abschätzung des bestehenden Windwurfrisikos vorangehen. Da eine sichere Prognose in der Regel nicht möglich ist, sollte der Rahmen möglicher Ergebnisse unter optimistischen und pessimistischen Annahmen abgesteckt werden. Darüber hinaus wird erläutert und empfohlen, Erwartungswerte des Nettonutzens zu ermitteln.

Abschließend wird versucht, die Ergebnisse der vorausgegangenen empirischen Untersuchung von HEUPEL et al. in eine Risikobeurteilung einzubeziehen und in eine Wahrscheinlichkeitstabelle für die Wirksamkeit von Wipfelköpfungen umzusetzen. Dabei wird die Risikolage für staunasse und stabile Standorte gesondert betrachtet.

Unter den daraus resultierenden, begründeten Annahmen ergibt sich, daß auf staunassen Standorten der Nettonutzen ab dem Köpfungsalter von 50 Jahren stark abfällt und bereits im Alter 70 die absolute Nutzschwelle unterschreitet. Auf den stabilen Standorten zeigen die Nettonutzen ähnliche Tendenzen, bleiben jedoch stets im positiven Bereich.

Unter der Prämisse kritisch-analytischer Entscheidungsfindung will die Arbeit insgesamt dazu anregen, die beschriebenen Entscheidungshilfen vermehrt in der Praxis einzusetzen.

## 7. SUMMARY

Title of the paper: On the economics of crown topping for  
protecting spruce stands from storm damages

Storm damages are affecting most of all possible goal elements of a forestry enterprise, reaching from timber production to generating services and social benefits and covering security goals and monetary aims as well. Storm damages diminish the degree to which these goals can be attained in very different ways and to largely different extents.

Having in mind the large variety of possible effects of storm damages and in view of the great number of affected goal elements it is extremely difficult to describe adequately all those influences and to forecast properly those effects. In practice this fairly confusing situation may lead to decisions on protection measures, without thorough economic analyses and without any reasoning on facts and future.

Therefore this investigation was carried out to provide economic tools for evaluating a planned crown topping measure and to support decision making in practice.

The following presuppositions criteria and parameters important for judging on the effectiveness of crown topping are identified:

- site conditions: e.g. storm risk (level of ground water table; exposure); water and nutrient supply.
- stand characteristics: e.g. stand height; relative crown length; depth of crown topping zone; size of the protected stand area.
- costs of crown topping: e.g. performance of crown topping; follow-up crown topping measures; losses due to stagnating height development within crown topping zone; top rot; increment losses.
- benefits of crown topping: e.g. prevention from direct stand damages; avoidance of indirect losses due to destabilized markets.

Storm damages show all typical features of management risks: they establish a danger potential with unpredictable time of occurrence and uncertain degree of destruction as well. Furthermore they cannot or can only insufficiently be controlled through managerial measures.

The utmost number of relevant cost and benefit data are not available as actual and up to date values at the time of decision making, but must be derived from prognosis. This introduces a high amount of intangibles and uncertainties. Also the high variety of possible influences advocates for reducing complexity down to a reasonable number of relevant factors and for establishing a simplified model describing the most important inferences of costs and benefits.

Therefore we reduce our scope to the direct effects of storm damage and concentrate on monetary goals of timber production.

The economic efficiency of crown topping can be derived from and evaluated by comparing the two different managerial situations and developments **with** and **without** crown topping.

The outcomes of this evaluation, costs and benefits as well, are highly determined by the differences in survival time between topped and untopped stands. Dependent on the survival time of the topped and the untopped stand 6 typical situations for evaluation and for decisions are identified. Based on standard methods of stand evaluation formulas are developed including the most important cost and benefit components and corresponding to those typical situations.

Net benefit is chosen as criterium to decide whether crown topping is advantageous or not. As a decision rule we claim that benefits should significantly override costs.

Stand models are based on the Norway spruce yield table, modest thinning, of WIEDEMANN 1936. Costs and benefits are evaluated on the price level of 1988. Performance costs of crown topping are

based on an inquiry of specialist firms. The decrease of timber volume conditioned by crown topping was calculated as difference between the value of the topped stand and that of the imagined untopped stand. Increment losses due to crown topping are estimated from the reduced rate of net photosynthesis. Extension of top rot is fixed at constant length of 2.5 m. Condensed results of extensive calculations are given in 4 tables (cf. appendix).

Ceteris paribus net benefit of crown topping is directly dependent on the area ratio between crown topping zone and total stand area. Area ratio is therefore chosen as reference axis in several decision diagrams to present some of the results for different typical situations. These diagrams can easily be used to determine the critical area ratio, given a certain level of net benefit required.

Some general recommendations can be drawn from these decision diagrams:

- a) stands selected for crown topping should have an average depth of 150-200 m provided that survival time of topped stands exceeds survival time of untopped stands at least by 20 years.
- b) For high site indexes the most beneficial effect is attained at a crown topping age between 50 and 60 years. For low site indexes the economic effects are on a lower level and tend to be highest at the crown topping age of 70.
- c) On better sites economic efficiency of crown topping decreases very rapidly with increasing age. On poorer sites it increases until the age of 70, approximately. This finding indicates that net benefit could be even higher on poorer sites when rotation age is extended beyond 100 years.

Decisions on crown topping have to be preceded by thorough consideration and forecasting of the risk that is imposed through storm damages. Having in mind the uncertainties inherent to the risk

prognosis a frame for possible economic effects should be developed under optimistic as well as pessimistic assumptions. The use of expected values of net benefit is explained and recommended.

Finally an attempt is made to include prior empirical investigations on the survival rate of crown topped stands into risk considerations and to convert these findings into a probability estimate. Stable and unfavorable site conditions as well are separately considered. Under reasonable assumptions net benefit of crown topping is shown to be highest at the age of 40 and tends to zero at the age auf 70 under unfavourable site conditions. Stable sites show the same tendency, but on a definitely higher level.

Provided that the decision making procedure is critic-analytic our investigation strongly supports the use of economic analysis in practice.

## 8. LITERATURVERZEICHNIS

Übersicht der im Literaturverzeichnis verwendeten Abkürzungen:

AFZ	Allgemeine Forstzeitschrift, München
AFJZ	Allgemeine Forst und Jagdzeitung
FA	Forstarchiv
FoHo	Forst- und Holzwirt
FTI	Forsttechnische Informationen
FWC	Forstwissenschaftliches Centralblatt
SZFF	Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen

- ALTHERR, E. (1978): Statistische Rindenbeziehungen aus Hilfsmitteln zur Ausformung und Aufmessung unentrindeten Stammholzes, Teil IV. Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (90)
- ANDRÉE, U. (1989): Synopse waldbaulicher Grundlagen und betriebswirtschaftlicher Kriterien der Buchen-Jungbestandspflege. Diplomarbeit, Forstwissenschaftliche Fakultät, Freiburg
- BERGEL, D. (1981): Neue Ausbauchungsreihen für die Baumart Fichte in Nordwestdeutschland. AFJZ 152: S. 71-74
- BEYREUTHER (1958): Wipfelköpfung als Windschutzmaßnahme. AFZ 13: S. 201
- BOSSHARD, W. (1967): Erhebungen über die Schäden der Winterstürme 1967. SZFF: S. 806-820
- BURGER, H. (1953): Holz, Blattmenge und Zuwachs: XIII. Mitteilung: Fichten im gleichaltrigen Hochwald. Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen, (1): S. 38-130
- DEINET, A. (1988): Zum Problem der betriebswirtschaftlichen Entscheidungskriterien bei Wipfelköpfung der Fichte [*Picea abies* (L.) Karst.]. Diplomarbeit, Forstwissenschaftliche Fakultät, Freiburg
- HEGER, A. (1948): Die Sicherung des Fichtenwaldes gegen Sturmschäden. Radebeul: Neumann Verlag
- HOUTERMANS (1958): Sturmsicherung durch Wipfelköpfung. AFZ (14): S. 200
- HÜTTE, P. (1964a): Untersuchungen über den Einfluß des Geländereiefs auf Richtung, Geschwindigkeit und Struktur des Sturmes im Hinblick auf die Sturmgefährdung der Fichte. Dissertation Göttingen
- (1964b): Sturmschutz in Fichtenbeständen. AFZ 19: S. 356-358
- (1967a): Möglichkeiten und Grenzen der Absicherung angebrochener Fichtenbestandesränder. FTI, S. 87-93

- HÜTTE, P. (1983): Die Absicherung angebrochener Fichtenbestandesränder gegen Sturmschäden in Abhängigkeit von Durchforstungsstärke und Standort. FWC: S. 343-349
- (1986): Möglichkeiten zur Reduzierung der Sturmschäden in Nadelbaumbeständen. AFZ 41: S. 1204-1206
- JENA, K.E. v. (1967): Erfahrungen mit Wipfelköpfung von Fichten in einem Privatrevier des Westharzes. FTI: S.94-96 u.(12)S.104
- KARIGL, H. (1965): Bleibt die entwipfelte Fichte stehen? SZFF: S. 704-705
- KIENE, P. (1970): Entscheidung über Durchführung der Wipfelköpfung nach dem Modell des Kostenvergleichs. Unveröffentlichte Seminararbeit aus dem Institut für Forsteinrichtung und Forstliche Betriebswirtschaft der Universität Freiburg i.Br.
- MASCHER, R. (1965): Die Sicherung sturmgeschädigter Fichten-nachwuchsbestände durch Wipfelköpfung. FoHo 20: S. 284
- OEHLER, H. (1967): Die Sturmgefährdung der Fichte. AFZ 22: S. 312-313
- (1969): Künftige Behandlung durch den Sturm aufgerissener Bestände und Wiederaufforstung der Sturmflächen. AFZ 24: S. 567-568
- PEERENBOOM, H.G. u. PETRI, H. (1986): Standortgerechte und stand-raumbezogene Ertragsdaten für die Bewirtschaftung der Fichte. FA 57: S. 123-128
- RICHTER, J. (1975): Die wirtschaftlichen Verluste von Fichtenbetrieben in Schnee- und Eisbruchlagen. Dissertation Freiburg
- ROHMEDER, E. (1937): Die Stammfäule der Fichte. Mitteilungen aus der Landesforstverwaltung Bayerns (23), München
- ROTTMANN, M. (1986): Wind- und Sturmschäden im Wald. Frankfurt: J.D. Sauerländer's Verlag
- SCHULZE, E.-D., FUCHS, M.I. and FUCHS, M. (1977): Special Distribution of Photosynthetic Capacity and Performance in a Mountain Spruce Forest of Northern Germany.  
 I. Biomass Distribution and Daily CO<sub>2</sub> Uptake in Different Crown Layers. Oecologia (29): S. 43-61  
 II. Climatic Control of Carbon Dioxide Uptake. Oecologia (29): S. 329-340  
 III. The Significance of the Evergreen Habit. Oecologia (30): S. 239-248
- STACH, W. (1925): Technische Sturmsicherung. Silva: S. 369-373
- VOLKERT, E. (1940): Die mechanisch-technischen Holzeigenschaften vom Schneebruch betroffener und verschonter Fichten des Erzgebirges. Tharandter Forstliches Jahrbuch: S. 386-425

VONHOFF, W. (1975): Wundfäule durch Wipfelköpfung. Unveröffentliche Referendararbeit aus dem Forstamt Oberkochen (Schwäb. Alb)

WINTERFELD, K. (1967): Erfahrungen mit Fichten-Wipfelköpfungen im Forstamt Westerhof. FTI: S. 96

WOODMAN, J.N. (1971): Varriation of Net Photosynthesis within the Crown of a Large Forst-grown conifer. Photosynthetica 5: S. 50-54

Tabelle 1: **ABTRIEBSWERTE, BESTANDESERWARTUNGSWERTE UND HIEBSUNREIFE FÜR FICHTE,**  
**Ertragstafel WIEDEMANN (mäßige Durchforstung)**

Anhang

Berechnungsgrundlagen: - Alterswertfaktoren (Empfehlungen AG Waldbewertung)

- Kulturkosten 6.600.-- DM/ha

- Sortentafel SCHÖPPER / DAUBER

- Güteklassenstruktur- u. Holzzerlöse nach Rohholzpreisbericht (1985) LFVerw Rh-Pf.

- Holzernstekosten: EST Geldfaktor 21,75 Dpf/Min, Zuschlag A + B = 22 %

- Lohnnebenkosten:

Alter -Jahre-	Abtriebswert [ A <sub>i</sub> ] - DM -			Bestandeserwartungswert [ HE <sub>i</sub> ] - DM -			Hiebsunreife		
	Ekl. I	Ekl. II	Ekl. III	Ekl. I	Ekl. II	Ekl. III	Ekl. I	Ekl. II	Ekl. III
5	0	0	0	6 909	6 823	6 742	6 909	6 823	6 742
10	0	0	0	8 760	8 127	7 385	8 760	8 127	7 385
15	0	0	0	10 818	9 559	8 016	10 818	9 559	8 016
20	0	0	0	12 927	11 022	8 686	12 927	11 022	8 686
25	0	0	0	15 139	12 549	9 381	15 139	12 549	9 381
30	0	0	0	17 454	14 076	10 102	17 454	14 076	10 102
35	0	0	0	19 974	15 699	10 810	19 974	15 699	10 810
40	0	0	0	22 649	17 417	11 544	22 649	17 417	11 544
45	0	0	0	25 581	19 198	12 278	25 581	19 198	12 278
47	0	0	0	26 816			26 816		
48	693			27 433			26 740		
50	761	0	0	28 719	21 139	13 025	27 958	21 139	13 025
55	7 804	0	0	31 959	23 143	13 798	24 155	23 143	13 798
56		637			23 557			22 920	
60	13 576	4 188	0	35 252	25 243	14 609	21 676	21 055	14 609
65	20 675	7 382	0	38 544	27 343	15 433	17 869	19 961	15 433
70	26 925	12 544	0	41 733	29 411	16 270	14 808	16 867	16 270
72			660			16 605			15 945
75	33 761	18 483	751	44 819	31 351	17 081	11 058	12 868	16 330
80	40 144	22 360	6 372	47 751	33 133	17 802	7 607	10 773	11 430
85	45 185	27 668	8 814	50 477	34 660	18 407	5 292	6 992	9 593
90	48 158	31 928	11 674	53 101	36 028	18 858	4 943	4 100	7 184
95	52 147	34 649	16 802	55 570	37 205	19 180	3 423	2 556	2 378
100	58 039	38 414	19 476	58 039	38 414	19 476	0	0	0
105	59 772	40 449	22 181	0	0	0	0	0	0
110	63 115	43 174	25 148	0	0	0	0	0	0
115	64 773	47 417	28 204	0	0	0	0	0	0
120	66 302	48 610	29 884	0	0	0	0	0	0

Anhang

Tabelle 2: Köpfungskosten pro Hektar Köpfungszone

Alter	Ertragsklasse I			Ertragsklasse II			Ertragsklasse III		
	Stamm- zahl	Stück- preis -DM-	Kosten pro ha -DM-	Stamm- zahl	Stück- preis -DM-	Kosten pro ha -DM-	Stamm- zahl	Stück- preis -DM-	Kosten pro ha -DM-
50	1326	11,82	15 673	1651	10,07	16 626	2422	8,38	20 296
60	1007	15,09	15 196	1276	13,03	6 626	1849	10,62	19 636
70	787	19,02	14 969	998	15,29	15 259	1453	12,82	18 627
80	631	25,57	16 135	790	20,00	15 800	1148	15,11	17 346
90	520	31,72	16 494	634	24,31	15 413	913	18,14	16 562

**Anhang**

**Tabelle 3: Kosten durch geköpfte Wipfelstücke und Zopffäule**

(die negativen Kosten entstehen durch Wegfall von Industrieholz aus den oberen Kronenteilen mit negativen erntekosten freien Erlösen)

Köpfungs- alter -Jahre-	Bestandes- alter -Jahre-	K o s t e n		
		EKl. I -DM/ha-	EKl. II -DM/ha-	EKl. III -DM/ha-
1	2	3	4	5
50	50	- 34	- 22	0
	60	749	544	70
	70	5 058	3 448	262
	80	7 347	5 837	2 390
	90	14 610	9 906	4 612
	100	16 306	12 678	10 952
	110	22 250	15 148	12 992
	120	27 392	19 998	13 422
60	60	19	- 100	0
	70	1 727	1 240	657
	80	4 240	3 651	864
	90	10 737	5 629	3 616
	100	11 024	7 158	7 036
	110	15 350	10 229	9 171
	120	19 310	13 581	9 827
70	70	- 152	- 258	0
	80	2 262	1 520	406
	90	5 223	2 765	1 932
	100	7 633	4 000	3 873
	110	10 775	6 440	6 267
	120	14 853	9 445	6 545
80	80	- 247	- 226	- 54
	90	3 032	1 460	902
	100	5 496	2 374	2 019
	110	7 635	4 182	3 807
	120	10 950	6 369	4 797
90	90	- 57	- 152	- 186
	100	3 478	944	675
	110	5 095	2 455	2 034
	120	8 499	4 718	3 075

Tabelle 4: Kosten durch Zuwachsverluste

Köpfungs- alter -Jahre-	Bestandes- alter -Jahre-	K o s t e n		
		Ekl. I -DM/ha-	Ekl. II -DM/ha-	Ekl. III -DM/ha-
1	2	3	4	5
50	50	0	0	0
	60	1 648	1 241	332
	70	3 062	1 527	1 122
	80	3 122	2 664	1 138
	90	3 831	2 699	1 311
	100	3 929	2 725	2 287
	110	3 978	3 354	2 294
	120	5 058	3 396	2 317
60	60	0	0	0
	70	2 654	1 293	967
	80	2 901	2 417	1 050
	90	3 559	2 449	1 210
	100	3 651	2 473	2 111
	110	3 697	3 043	2 117
	120	4 700	3 082	2 138
70	70	0	0	0
	80	2 519	2 033	916
	90	3 311	2 207	1 130
	100	3 396	2 228	1 972
	110	3 439	2 243	1 979
	120	4 372	2 777	1 998
80	80	0	0	0
	90	2 887	1 878	994
	100	3 130	2 032	1 859
	110	3 169	2 501	1 865
	120	4 029	2 533	1 883
90	90	0	0	0
	100	2 700	1 757	1 530
	110	5 095	2 929	1 652
	120	3 723	2 347	1 668

Tabelle 5: Alterswertfaktoren

(von der Arbeitsgemeinschaft Waldbewertung und dem DFWR empfohlen)

Alter	EKl I	EKl II	EKl III	Alter	EKl I	EKl II	EKl III
4	0.000	0.000	0.000	51	0.442	0.469	0.511
5	0.006	0.007	0.011	52	0.455	0.482	0.523
6	0.013	0.015	0.021	53	0.467	0.495	0.535
7	0.020	0.023	0.031	54	0.480	0.507	0.547
8	0.027	0.031	0.041	55	0.493	0.520	0.559
9	0.035	0.039	0.051	56	0.505	0.533	0.571
10	0.042	0.048	0.061	57	0.518	0.546	0.584
11	0.050	0.056	0.070	58	0.531	0.560	0.596
12	0.058	0.065	0.080	59	0.544	0.573	0.609
13	0.066	0.074	0.090	60	0.557	0.586	0.622
14	0.074	0.083	0.100	61	0.570	0.599	0.635
15	0.082	0.093	0.110	62	0.583	0.613	0.647
16	0.090	0.102	0.120	63	0.596	0.626	0.660
17	0.098	0.111	0.131	64	0.608	0.639	0.673
18	0.106	0.120	0.141	65	0.621	0.652	0.686
19	0.115	0.130	0.151	66	0.634	0.665	0.699
20	0.123	0.139	0.162	67	0.646	0.678	0.713
21	0.132	0.149	0.173	68	0.659	0.691	0.726
22	0.140	0.158	0.183	69	0.671	0.704	0.739
23	0.149	0.168	0.194	70	0.683	0.717	0.751
24	0.157	0.177	0.205	71	0.696	0.729	0.764
25	0.166	0.187	0.216	72	0.708	0.742	0.777
26	0.175	0.196	0.227	73	0.720	0.754	0.790
27	0.184	0.206	0.238	74	0.732	0.766	0.802
28	0.193	0.216	0.249	75	0.743	0.778	0.814
29	0.202	0.226	0.260	76	0.755	0.790	0.826
30	0.211	0.235	0.272	77	0.766	0.801	0.838
31	0.221	0.245	0.283	78	0.777	0.812	0.849
32	0.230	0.255	0.294	79	0.789	0.823	0.860
33	0.240	0.266	0.305	80	0.800	0.834	0.870
34	0.250	0.276	0.316	81	0.811	0.844	0.881
35	0.260	0.286	0.327	82	0.821	0.854	0.891
36	0.270	0.297	0.339	83	0.832	0.864	0.900
37	0.280	0.307	0.350	84	0.842	0.873	0.809
38	0.291	0.318	0.361	85	0.853	0.882	0.917
39	0.301	0.329	0.372	86	0.863	0.891	0.925
40	0.312	0.340	0.384	87	0.873	0.900	0.923
41	0.323	0.351	0.395	88	0.884	0.908	0.940
42	0.335	0.362	0.406	89	0.894	0.917	0.946
43	0.346	0.373	0.418	90	0.904	0.925	0.952
44	0.357	0.385	0.429	91	0.913	0.932	0.958
45	0.369	0.396	0.441	92	0.923	0.940	0.963
46	0.381	0.408	0.452	93	0.933	0.948	0.968
47	0.393	0.420	0.464	94	0.943	0.955	0.973
48	0.405	0.432	0.475	95	0.952	0.962	0.977
49	0.417	0.444	0.487	96	0.962	0.970	0.982
50	0.430	0.457	0.499	97	0.971	0.977	0.986
				98	0.981	0.984	0.990
				99	0.990	0.992	0.995
				100	1.000	1.000	1.000

**DIE ANALYSE DISKRETER DATEN  
MIT HILFE VON LOGLINEAREN MODELLEN**

**von**

**U. Wunn**

## INHALTSVERZEICHNIS

### 1. EINLEITUNG

### 2. LOGLINEARE MODELLE

#### 2.1 Modellansatz

#### 2.2 Varianz und Konfidenzintervalle

#### 2.3 Hypothesen in (r x s)-Tafeln

##### 2.3.1 Unabhängigkeits- oder Gleichverteilungshypothesen

##### 2.3.2 Die bedingte Gleichverteilungshypothese

##### 2.3.3 Die totale Gleichverteilungshypothese

#### 2.4 Hierarchische Modelle

#### 2.5 Testverfahren in (r x s)-Tafeln

##### 2.5.1 Teststatisiken

##### 2.5.2 Freiheitsgrade

#### 2.6 Verteilungsannahmen und Maximum-Likelihood-Schätzer

### 3. MEHRDIMENSIONALE KONTINGENZTAFELN (DIMENSION > 2)

#### 3.1 Zielsetzung

#### 3.2 Entscheidungshilfen

##### 3.2.1 Die Parameter des saturierten Modells

##### 3.2.2 Terme gleicher Ordnung

##### 3.2.3 Tests für individuelle Terme

##### 3.2.4 Schrittweise Elimination

### 4. LOGITMODELLE

### 5. AUSWERTUNG EINER MEHRDIMENSIONALEN KONTINGENZTAFEL AM BEISPIEL VON DATEN ÜBER WIPFELKÖPFUNG

#### 5.1 Problemstellung

#### 5.2 Auswertung

#### 5.3 Interpretation der Parameter

### 6. ZUSAMMENFASSUNG

### 7. SUMMARY

### 8. LITERATUR

## 1. EINLEITUNG

Eine häufig auftauchende Problemstellung in den Forstwissenschaften ist die Suche nach Abhängigkeiten zwischen Variablen, die höchstens ordinalskaliert, meist jedoch nur nominalskaliert vorliegen. Die Daten werden in mehrdimensionalen Tafeln, sog. Kontingenztafeln aufbereitet. Diese lassen sich mit den herkömmlichen Verfahren der Varianzanalyse nicht untersuchen. Die Bedeutung dieser i.d.R. nichtparametrischen Verfahren in den Forstwissenschaften ist bereits wiederholt hervorgehoben worden (z.B. ROEDER, 1979).

Loglineare Modelle bieten eine Möglichkeit, solche Daten zu beschreiben. Mit ihrer Hilfe lassen sich mehrdimensionale Kontingenztafeln analysieren und darin enthaltene Abhängigkeiten aufdecken. Eine Teilklasse dieser Modelle, sogenannte Logitmodelle, erlaubt, ähnlich wie bei der Varianzanalyse, die Beschreibung der Abhängigkeit einer alternativ ausgeprägten Variablen von anderen erfaßten Merkmalen.

## 2. LOGLINEARE MODELLE

### 2.1. Modellansatz

Der loglineare Modellansatz wird an einer zweidimensionalen ( $r \times s$ ) - Tafel erläutert. Die Ergebnisse können dann kanonisch auf höhere Dimensionen übertragen werden.

Sei  $r$  die Anzahl der Ausprägungen der Zeilen- und  $s$  die Anzahl der Ausprägungen der Spaltenvariable.

Der Ansatz für das saturierte Modell, in dem alle möglichen Wechselwirkungen enthalten sind, lautet dann :

$$\ln m_{ij} = u + u_1(i) + u_2(j) + u_{12}(ij) \text{ alle } i, j . \quad (2.1-1)$$

Aus Gleichung (2.1-1) ergibt sich :

$$m_{ij} = \exp(u + u_1(i) + u_2(j) + u_{12}(ij)),$$

d.h.

$$m_{ij} = \exp(u) \cdot \exp(u_1(i)) \cdot \exp(u_2(j)) \cdot \exp(u_{12}(ij)) \text{ alle } i, j.$$

Es gelten dabei folgende Nebenbedingungen:

$$\sum_{i=1}^r u_1(i) = \sum_{j=1}^s u_2(j) = 0 \quad (2.1-2)$$

$$\sum_{i=1}^r u_{12}(ij) = \sum_{j=1}^s u_{12}(ij) = 0 \quad (2.1-3)$$

Für die Parameter erhalten wir folgende Ausdrücke (vgl. HARTUNG, 1985) :

$$u = \frac{1}{r \cdot s} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \ln m_{ij}$$

$$u_{1(1)} = \frac{1}{s} \sum_{j=1}^s \ln m_{1j} - \frac{1}{r \cdot s} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \ln m_{ij}$$

$$u_{2(j)} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \ln m_{ij} - \frac{1}{r \cdot s} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \ln m_{ij}$$

$$u_{12(ij)} = \ln m_{ij} - \frac{1}{s} \sum_{j=1}^s \ln m_{ij} - \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \ln m_{ij} + \frac{1}{r \cdot s} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \ln m_{ij}$$

Diese Werte können durch Einsetzen der beobachteten Häufigkeiten  $n_{ij}$  aus einem gegebenen Datenmaterial geschätzt werden.

## 2.2. Varianz und Konfidenzintervalle

Für die Angabe von Konfidenzintervallen werden noch die Schätzungen der Varianzen dieser approximativ normalverteilten Zufallsgrößen benötigt (vgl. HARTUNG, 1985).

$$\text{Var}(u) = \left(\frac{1}{rs}\right)^2 \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \frac{1}{n_{ij}} - \frac{1}{n},$$

$$\text{Var}(u_{1(1)}) = \left(\frac{1}{rs}\right)^2 \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \frac{1}{n_{ij}} + \frac{r-2}{rs^2} \sum_{j=1}^s \frac{1}{n_{ij}},$$

$$\text{Var}(u_{2(j)}) = \left(\frac{1}{rs}\right)^2 \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \frac{1}{n_{ij}} + \frac{s-2}{r^2s} \sum_{i=1}^r \frac{1}{n_{ij}},$$

$$\text{Var}(u_{12(ij)}) = \left(\frac{1}{rs}\right)^2 \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \frac{1}{n_{ij}} + \frac{r-2}{rs^2} \sum_{j=1}^s \frac{1}{n_{ij}} + \frac{s-2}{r^2s} \sum_{i=1}^r \frac{1}{n_{ij}} + \frac{(r-2)(s-2)}{rs} \cdot \frac{1}{n_{ij}}$$

## 2.3. Hypothesen in (r x s)-Tafeln

Das bisher betrachtete saturierte Modell enthält alle möglichen Parameter. Von Interesse ist natürlich die Frage, ob wirklich alle Effekte einen Einfluß haben. Dazu werden nun einige Hypothesen formuliert.

### 2.3.1. Unabhängigkeits- oder Gleichverteilungshypothese

Der Parameter  $u_{12(ij)}$  stellt eine Maßzahl für die Wechselwirkung der beiden Variablen  $A_1$  und  $A_2$  dar.

Ist  $u_{12(ij)} = 0$ , so sind beide Variablen unabhängig. Die Hypothese lautet also :

$$H_0 : u_{12(ij)} = 0$$

Trifft  $H_0$  zu, so muß für  $m_{ij}$  gelten :

$$m_{ij} = \frac{m_{i.} \cdot m_{.j}}{n} \quad (2.3-1)$$

wobei  $m_{i.}$  Zeilensumme in der  $i$ -ten Zeile und  $m_{.j}$  Spaltensumme in der  $j$ -ten Spalte.

Denn unter  $H_0$  lassen sich die  $m_{ij}$  in folgender Form darstellen :

$$m_{ij} = \exp(u + u_{1(1)} + u_{2(j)})$$

$$\ln m_{1j} = u + u_{1(1)} + u_{2(j)}.$$

Damit gilt :

$$m_{1.} = \exp(u + u_{1(1)} \cdot \sum_{j=1}^s \exp(u_{2(j)}))$$

und

$$m_{.j} = \exp(u + u_{2(j)} \cdot \sum_{i=1}^r \exp(u_{1(i)}))$$

$$\Rightarrow m_{1.} \cdot m_{.j} = m_{1j} \cdot n \quad (\text{siehe 2.3-1}).$$

### 2.3.2. Die bedingte Gleichverteilungshypothese

$$H_{0;\text{bed1}} : u_{1(1)} = u_{12(1j)} = 0$$

Für die bedingten Wahrscheinlichkeiten unter  $H_{0;\text{bed1}}$  gilt:

$$\frac{p_{1j}}{p_{.j}} = \frac{m_{1j}}{m_{.j}} = \frac{\exp(u+u_{2(j)})}{\sum_{i=1}^r \exp(u+u_{2(j)})} = \frac{\exp(u+u_{2(j)})}{r \cdot \exp(u+u_{2(j)})} = \frac{1}{r}$$

Bleibt man also innerhalb einer Spalte (Bedingung), so ist das Zeilenmerkmal gleichverteilt.

Entsprechend lautet die Hypothese für das andere Merkmal.

$$H_{0;\text{bed2}} : u_{2(j)} = u_{12(1j)} = 0.$$

In diesem Fall gilt  $p_{1j}/p_{1.} = 1/s$ .

### 2.3.3. Die totale Gleichverteilungshypothese

$$H_{0;\text{tot}} : u_{1(1)} = u_{2(j)} = u_{12(1j)} = 0$$

Hier haben alle  $m_{1j}$  den gleichen Wert:

$$m_{1j} = \exp(u) = \frac{1}{rs} \cdot n$$

## 2.4. Hierarchische Modelle

Alle bisher vorgetragenen Überlegungen stützen sich auf sog. hierarchische Modelle. Dabei impliziert das Vorhandensein eines Effektes höherer Ordnung, daß alle Effekte niedriger Ordnung vorhanden sind.

In unseren Betrachtungen scheidet beispielsweise das Modell  $\ln m_{1j} = u + u_{1(1)} + u_{12(1j)}$  aus. Es fehlt der Term  $u_{2(j)}$ .

Zur Festlegung eines Modells reicht es somit aus, die Wechselwirkungen höchster vorkommender Ordnungen anzugeben. Die Terme  $u_{12}$  und  $u_3$  legen das Modell  $\{ u + u_1 + u_2 + u_3 + u_{12} \}$  fest.

Die Benutzung hierarchischer Modelle hat viele Vorteile gegenüber nichthierarchischen Modellen; insbesondere sind sie einfacher zu interpretieren (vgl. BISHOP et al. 1975).

## 2.5. Testverfahren in (r x s)-Tafeln

Für saturierte Modelle werden die erwarteten Häufigkeiten durch die beobachteten Häufigkeiten geschätzt. Die explizite Angabe der Schätzwerte für nicht saturierte Modelle ist nicht in jedem Fall gewährleistet. Immer dann, wenn in der generierenden Klasse (Menge der höchsten vorkommenden Parameter, die das hierarchische Modell bestimmen) Zyklen (closed loops) in den Indizes vorkommen, können die Häufigkeiten nur iterativ bestimmt werden (vgl. BISHOP et al., 1975). Das gilt beispielsweise für das Modell mit der generierenden Klasse  $u_{12}, u_{23}, u_{13}$ .

Einen Algorithmus zur Bestimmung der Schätzwerte für die erwarteten Häufigkeiten geben BISHOP et al. (1975) oder HARTUNG (1985) an.

### 2.5.1. Teststatistiken

Hat man die unter Annahme der Gültigkeit einer Hypothese erwarteten Häufigkeiten geschätzt, so kann man zwei Teststatistiken zur Überprüfung der Hypothese benutzen:

a) die Chi-Quadrat-Statistik

$$X^2 = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \frac{(n_{ij} - m_{ij})^2}{m_{ij}}$$

b) die Likelihood-Quotienten-Statistik

$$G^2 = 2 \cdot \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s n_{ij} \ln \frac{n_{ij}}{m_{ij}}$$

Beide Statistiken sind unter der zu testenden Nullhypothese asymptotisch  $X^2$ -verteilt.

### 2.5.2. Freiheitsgrade

Wurden über das Iterationsverfahren die Zelhäufigkeiten ermittelt, so können die entsprechenden Werte für  $X^2$  bzw.  $G^2$  berechnet werden. Lediglich die Bestimmung der Freiheitsgrade ist zur Beurteilung noch notwendig. Für einen einzelnen Term ergeben sich die Freiheitsgrade als Produkt über alle um eins verminderten Merkmalsausprägungen der beteiligten Variablen.

Betrachten wir z.B. ein vierdimensionales Modell mit  $N=rsta$  Zellen. Der Term

$u_{123}$  hat dann  $(r-1)(s-1)(t-1)$  Freiheitsgrade,

$u_{124}$  hat dann  $(r-1)(s-1)(a-1)$  Freiheitsgrade,

$u_{23}$  hat dann  $(s-1)(t-1)$  Freiheitsgrade.

Die Anzahl der Freiheitsgrade für die  $X^2$ -Statistik ergibt sich dann als Summe über alle Freiheitsgrade der im Modell nicht berücksichtigten Terme. Ein Test kann also folgendermaßen durchgeführt werden:

Für die zu testende Nullhypothese werden die erwarteten Häufigkeiten geschätzt, die Teststatistik und die Freiheitsgrade berechnet. Ist der gefundene Wert größer als das  $(1-\alpha)$ -Quantil der zugehörigen  $X^2$ -Verteilung, so wird die Hypothese zum Niveau  $\alpha$  verworfen.

## 2.6. Verteilungsannahmen und Maximum-Likelihood-Schätzer

Um die Maximum-Likelihood-Schätzer für die einzelnen erwarteten Zellhäufigkeiten zu erhalten, müssen die der Stichprobe zugrundeliegende Auswahlmechanismen betrachtet werden.

Macht man im Voraus keine Beschränkung des Stichprobenumfangs, so hat jede Zelle eine unabhängige Poisson-Verteilung. Solche Verteilungen tauchen bei Beobachtungen über eine gewisse Zeitspanne auf, bei denen man keine a priori Kenntnisse über die Gesamtzahl der Beobachtungen hat. (vgl. BISHOP et al., 1975).

Ist der Stichprobenumfang  $N$  fix, so liegt eine Multinomialverteilung vor. (vgl. BISHOP et al., 1975).

Ist darüberhinaus noch eine Randverteilung im Voraus festgelegt, so erhält man eine Produkt-Multinomialverteilung (vgl. BISHOP et al., 1975).

Bei allen drei Verteilungstypen erhält man dieselben Maximum-Likelihood-Schätzer.

## 3. MEHRDIMENSIONALE KONTINGENZTAFELN ( DIMENSION > 2 )

### 3.1. Zielsetzung

Ein wesentliches Ziel bei der Analyse von Datenmaterial ist seine Beschreibung mit möglichst wenigen Parametern. Die Auswahl eines solchen Modells ist jedoch nicht immer einfach zu treffen. Bereits bei einer vierdimensionalen Kontingenztafel gibt es 113 mögliche hierarchische loglineare Modelle, die die Daten beschreiben können. Im Folgenden werden Auswahlmechanismen und -algorithmen vorgestellt, die das Auffinden eines solchen Modells ermöglichen sollen. Bei jeder Eliminierung von Parametern besteht das Ziel darin, einen möglichst kleinen Wert für  $X^2$  bzw.  $G^2$  unter Berücksichtigung der entsprechenden Freiheitsgrade zu erhalten, wobei die zugehörige Irrtumswahrscheinlichkeit, die Hypothese abzulehnen, über dem gewählten Niveau  $\alpha$  liegen soll.

### 3.2. Entscheidungshilfen für die Auswahl eines Modells

#### 3.2.1. Die Parameter des saturierten Modells

Alles bisher Beschriebene kann in kanonischer Weise auf mehr Dimensionen übertragen werden.

Durch die Schätzung der Parameter des saturierten Modells und deren Varianzen erhält man schon einen ersten Eindruck über das Auftreten gewisser Effekte und Anhaltspunkte für eventuell zu testende Hypothesen.

Die Parameter lassen sich in einem allgemeinen saturierten Modell analog zu den schon behandelten (r x s)-Tafeln berechnen.

Für eine vierdimensionale Tafel soll der Parameter  $u_{123(1jk)}$  bestimmt werden. Dazu werden zunächst alle Logarithmen der erwarteten Häufigkeiten über alle Indizes gemittelt, von denen der Parameter nicht abhängt (HARTUNG, 1985). Bei  $u_{123(1jk)}$  ist das nur der 4. Index 1.

Man erhält :  $\frac{1}{a} \sum_{i=1}^a \ln m_{1jk1}$  .

Von diesem Ausdruck werden dann alle zu  $u_{123}$  gehörigen Terme niedrigerer Ordnung, sowie  $u$  subtrahiert.

Es ergibt sich also :

$$u_{123(1jk)} = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a \ln m_{1jk1} - u_{12(1j)} - u_{13(1k)} - u_{23(jk)} - u_1(1) - u_2(j) - u_3(k) - u$$

Da die erwarteten Häufigkeiten im saturierten Modell gleich den beobachteten Häufigkeiten ist, brauchen die Zelleinträge nur logarithmiert und in die entsprechenden Gleichungen eingetragen zu werden.

Parameter, deren Werte bei Null liegen und deren Konfidenzintervall die Null einschließt, sind Kandidaten für die Elimination. Auf diese Weise erhält man erste Anhaltspunkte für eine Reduzierung der Parameter.

#### 3.2.2 Terme gleicher Ordnung

Eine weitere Strategie im Auffinden eines "besten" Modells besteht im Vergleich von Modellen mit Termen gleicher Ordnung. Aufgestellt werden nacheinander Modelle mit

- a) allen Haupteffekten,
  - b) allen Effekten zweiter Ordnung ohne höhere Ordnungen,
  - c) allen Effekten dritter Ordnung ohne höhere Ordnungen,
- usw.

Anschließend sucht man die beiden benachbarten Modelle, wovon eines eine gute, eines eine schlechte Beschreibung der Daten liefert.

Schließlich werden alle die Modelle getestet, die zwischen diesen beiden Modellen liegen und davon das "beste" ausgewählt.

Bei diesem Verfahren werden nachfolgende Annahmen unterstellt:

a) die Anpassungsgüte ist monoton steigend mit zunehmender Ordnung;

b) das bestangepaßte Modell liegt zwischen den beiden oben bestimmten Modellen.

Ausgeschlossen werden bei dieser Verfahrensweise allerdings die Modelle, die z.B. aus Termen der Ordnung  $r$  und  $r-2$  bestehen (z.B. mit der generierenden Klasse  $u_1, u_{234}$ ), da ja nur Modelle unmittelbar nachfolgender Ordnungen verglichen werden.

Eine ausführliche Beschreibung dieses Verfahrens findet man in BISHOP et al. (1975).

### 3.2.3. Tests für individuelle Terme

Eine weitere Möglichkeit der Selektion von Termen besteht in der Auswahl nach den  $G^2$ -Partitionen der einzelnen Effekte (vgl. 2.5.1). Wird etwa die Partition einer 3-fach Wechselwirkung gesucht, so wird ein Modell mit allen 3-fach Termen und ein Modell ohne diesen speziellen Term aufgestellt. Die Differenz der  $G^2$ -Werte ergibt den individuellen Beitrag.

Beispielsweise soll der Einfluß von  $u_{123}$  in einer 3-dimensionalen Tafel bestimmt werden. Berechnet wird zunächst das saturierte Modell und anschließend das um  $u_{123}$  verminderte Modell. Der Beitrag für  $G^2$  ergibt sich dann als Differenz zwischen saturiertem und vermindertem Modell :

$$G^2_{\text{sat}} - G^2_{\text{ohne } u_{123}} = G^2_{\text{partial}} .$$

Man entfernt dann alle diejenigen Effekte mit hohem Chi-Quadrat, deren Signifikanzniveau größer als  $\alpha$  ist.

### 3.2.4. Schrittweise Elimination

Bei diesem Verfahren wird bei einem Modell mit höheren Ordnungen begonnen. Schrittweise wird jeweils bei den Termen höchster vorkommender Ordnung geprüft, ob durch die Elimination eines Parameters die Teststatistik schlechter wird. Verändert sich die Modellgüte nur unwesentlich, so kann dieser Term herausgenommen werden. Das Verfahren endet, wenn keine geeigneten Parameter mehr gefunden werden.

#### 4.0 LOGITMODELLE

Liegt in einer Untersuchung eine Variable mit nur zwei Ausprägungen (alternative Variable) vor, die von allen anderen Variablen abhängig ist, so kann eine Teilklasse von loglinearen Modellen, sog. Logitmodelle, gebildet werden.

Betrachtet werden beispielsweise drei Variablen  $A_1, A_2, A_3$ , wobei  $A_1$  die abhängige Variable bezeichnen soll.

Für die Logarithmen der Zellhäufigkeiten gilt dann:

$$\ln m_{1jk} = u + u_1(1) + u_2(j) + u_3(k) + u_{12}(1j) + u_{13}(1k) + u_{23}(jk) + u_{123}(1jk)$$

$$\ln m_{2jk} = u + u_1(2) + u_2(j) + u_3(k) + u_{12}(2j) + u_{13}(2k) + u_{23}(jk) + u_{123}(2jk)$$

Für den Quotienten  $m_{1jk}/m_{2jk}$ , der jeweils beide Merkmalsausprägungen von  $A_1$  vergleicht, gilt dann:

$$\ln (m_{1jk}/m_{2jk}) = \ln m_{1jk} - \ln m_{2jk} = u_1(1) - u_1(2) + u_{12}(1j) - u_{12}(2j) + u_{13}(1k) - u_{13}(2k) + u_{123}(1jk) - u_{123}(2jk)$$

Parameter, die Wechselwirkungen nur zwischen unabhängigen Variablen beschreiben, sind redundant.

Setzt man

$$w := u_1(1) - u_1(2) = 2u_1(1), \quad (4.1-1)$$

$$w_1(j) := u_{12}(1j) - u_{12}(2j) = 2u_{12}(1j), \quad (4.1-2)$$

$$w_2(k) := u_{13}(1k) - u_{13}(2k) = 2u_{13}(1k), \quad (4.1-3)$$

$$w_{12}(jk) := u_{123}(1jk) - u_{123}(2jk) = 2u_{123}(1jk). \quad (4.1-4)$$

Dann gilt:

$$\ln (m_{1jk}/m_{2jk}) = w + w_1(j) + w_2(k) + w_{12}(jk) .$$

bzw.

$$\begin{aligned} m_{1jk}/m_{2jk} &= \exp(w+w_1(j)+w_2(k)+w_{12}(jk)) \\ &= \exp(w) \cdot \exp(w_1(j)) \cdot \exp(w_2(k)) \cdot \exp(w_{12}(jk)). \end{aligned}$$

Die Einflüsse der einzelnen Parameter auf das Verhältnis  $m_{1jk}/m_{2jk}$  sind direkt ablesbar.

Für einen Parameter  $w_\theta < 0$  gilt  $\exp(w_\theta) < 1$ , d.h. der Einfluß der Wechselwirkung  $\theta$  vergrößert den Nenner des Verhältnisses. Für einen Parameter  $w_\theta > 0$  gilt  $\exp(w_\theta) > 1$ , d.h. der Zähler wird vergrößert. Ist  $w_\theta = 0$ , so wird  $\exp(w_\theta) = 1$ , d.h. der Einfluß der Wechselwirkung  $\theta$  hat keinen Einfluß auf das oben angegebene Verhältnis.

## 5. AUSWERTUNG EINER MEHRDIMENSIONALEN KONTINGENZTAFEL AM BEISPIEL VON DATEN ÜBER WIPFELKÖPFUNG

### 5.1. Problemstellung

An N = 764 Fichtenbeständen wurde die Abhängigkeit der Standfestigkeit von den Merkmalen Standortgrundform, Altersklasse und Wipfelköpfung untersucht. Tabelle 1 enthält die möglichen Ausprägungen der einzelnen Variablen.

Tab. 1 Beschreibung der untersuchten Variablen  
*Description of the investigated variables*

Variable	Index	Ausprägungen
Standfestigkeit	i	1 = umgefallen, 2 = noch stehend
Köpfung	j	1 = geköpft 2 = nicht geköpft
Alter	k	1 = Altersklasse II 2 = Altersklasse III 3 = Altersklasse IV 4 = Altersklasse V
Standortgrundform	l	1 = Grundformen ≤ VII 2 = Grundform = VIII 3 = Grundformen IX/X

Die erhobenen Daten stehen in Tabelle 2.

Da die abhängige Variable "Standfestigkeit" nur in zwei Ausprägungen vorkommt, kann ein Logitmodell angepaßt werden.

### 5.2. Auswertung

Die Daten wurden mit dem Programmpaket SPSS<sup>x</sup> (Statistical Package for the Social Sciences) ausgewertet. Alle oben beschriebenen Algorithmen zur Selektion eines Modells sind darin enthalten.

Zuerst werden die Parameter des saturierten Modells bestimmt. Die Interpretation als Logit-Modell erhält man einfach dadurch, daß man redundante Effekte (=Parameter, die nur unabhängige Variablen berücksichtigen) ignoriert und die restlichen Werte verdoppelt (vgl. Gleichungen 4.1-1 bis 4.1-4).

Tab 2. Anordnung der Daten in einer Kontingenztafel  
Contingency table of the data

Standfestigkeit = 1 (umgefallen) Wipfelköpfung = 2 (nicht geköpft)

		Altersklasse				
		$n_{1k}$	II = 1	III = 2	IV = 3	V = 4
Stand- ort- grund- form	$\leq$ VII=1		1	5	13	9
	VIII=2		3	36	46	31
	IX/X=3		11	22	25	12

Standfestigkeit = 1 (umgefallen) Wipfelköpfung = 1 (geköpft)

		Altersklasse				
		$n_{1k}$	II = 1	III = 2	IV = 3	V = 4
Stand- ort- grund- form	$\leq$ VII=1		6	9	5	2
	VIII=2		9	11	6	7
	IX/X=3		22	24	18	7

Standfestigkeit=2 (nicht gefallen) Wipfelköpfung=2 (nicht geköpft)

		Altersklasse				
		$n_{1k}$	II = 1	III = 2	IV = 3	V = 4
Stand- ort- grund- form	$\leq$ VII=1		53	22	25	30
	VIII=2		47	24	19	18
	IX/X=3		22	13	4	4

Standfestigkeit = 2 (nicht gefallen) Wipfelköpfung = 1 (geköpft)

		Altersklasse				
		$n_{1k}$	II = 1	III = 2	IV = 3	V = 4
Stand- ort- grund- form	$\leq$ VII=1		22	17	14	8
	VIII=2		12	6	8	4
	IX/X=3		19	12	4	4

Die Parameter des saturierten Modells weisen  $w_{13}$ ,  $w_{23}$  sowie  $w_{123}$  zum Eliminieren aus.

Der Test, daß  $k$ -fache und höhere Wechselwirkungen Null sind, ergibt für  $k = 4$  ein positives Ergebnis, für  $k = 3, 2, 1$  muß die Hypothese abgelehnt werden (vgl. Tabelle 3).

Tab. 3 Tests, daß  $k$ -fache und höhere Ordnungen gleich Null sind  
*Tests that  $K$ -way and higher order effects are zero*

k	Freiheitsgrade	G <sup>2</sup>	P	X <sup>2</sup>	P
4	6	4,224	0,646	4,269	0,640
3	23	43,656	0,006	42,420	0,008
2	40	300,459	0,000	283,161	0,000
1	47	422,425	0,000	457,487	0,000

Die Tests für individuelle Terme (vgl. Tabelle 4) weisen die Parameter  $w_{13}$  und  $w_{23}$  als Kandidaten für die Elimination aus.

Tab. 4 Tests für individuelle Terme  
*Tests of partial associations*

Parameter	Freiheitsgrade	G <sup>2</sup>	P
$w_{12}$	3	24,473	0,000
$w_{13}$	2	4,224	0,121
$w_{23}$	6	4,530	0,605
$w_1$	1	2,148	0,143
$w_2$	3	83,107	0,000
$w_3$	2	108,877	0,000
$w$	1	4,410	0,036

Die Methode der Backward-Elimination liefert gleichermaßen als generierende Klasse  $w_{12}$  und  $w_3$ .

Die Teststatistik für das ausgewählte Modell ergibt mit  $G^2 = 12,833$  bzw.  $X^2 = 12,873$  (mit jeweils 14 Freiheitsgraden) eine genügende Modellanpassung (vgl. Tabelle 5).

Die Assoziationsmaße in Tabelle 5 können nach NORUSIS (1985) ähnlich wie ein Regressionskoeffizient interpretiert werden. Die beiden Werte, die sich auf unterschiedliche Dispersionsmaße beziehen, zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Variablen untereinander.

Mit allen oben angegebenen Hilfsmitteln wurde schließlich folgendes Logit-Modell ausgewählt:

$$\ln (m_{1jk1}/m_{2jk1}) = w + w_1(j) + w_2(k) + w_3(l) + w_{12}(jk)$$

$$\text{mit } w = 2u_{1(1)},$$

$$w_1(j) = 2u_{12(1j)},$$

$$w_2(k) = 2u_{13(1k)},$$

$$w_3(l) = 2u_{14(1l)},$$

$$w_{12}(jk) = 2u_{123(1jk)}.$$

Tab. 5 Teststatistiken  
*Test statistics*

Testgüte : $G^2 = 12,833$ $FG = 14$ $P = 0,540$			
<hr/>			
$X^2 = 12,873$ $FG = 14$ $P = 0,537$			
Analysis of Dispersion :			
<hr/>			
Source of Variation	Entropy	Concentration	FG
Due to Model	106,365	95,115	
Due to Residual	420,996	284,798	
Total	527,361	379,798	763
Measures of Association :			
<hr/>			
Entropy	= 0,2017		
Concentration	= 0,2504		

### 5.3. Interpretation der Parameter

Die Parameter  $w_0$  des selektierten Modells und deren Funktionswerte  $\exp(w_0)$  sind in Tabelle 6 aufgelistet.

Die Faktoren  $\exp(w_0)$  können nun direkt interpretiert werden. Die Parameter  $w_{3(l)}$  ( $l=1,2,3$ ) beschreiben den Einfluß der Standortgrundform auf das Verhältnis der umgefallenen zu den noch stehenden Beständen. Bei den auf trockenen Standorten stehenden Beständen ( $\leq VII$ ) verringert sich der Wert des Quotienten ( $\exp(w_{3(1)}) = 0,3$ ); sie neigen also weniger dazu, umzufallen. Für mittlere und nasse Standorte (VIII und IX/X) gilt das Gegenteil (1,28; 2,63).

Tab: 6 Werte der berechneten Parameter  
*Values of the calculated parameter*

Parameter $w_0$	Wert	$\exp(w_0)$
W	-0,2218	0,80
W <sub>1</sub> (1)	1,1698	3,22
W <sub>1</sub> (2)	-1,1698	0,31
W <sub>2</sub> (1)	-1,1836	0,31
W <sub>2</sub> (2)	0,3232	1,38
W <sub>2</sub> (3)	0,5816	1,79
W <sub>2</sub> (4)	0,2788	1,32
W <sub>3</sub> (1)	-1,1998	0,30
W <sub>3</sub> (2)	0,2340	1,28
W <sub>3</sub> (3)	0,9658	2,63
W <sub>12</sub> (11)	0,7028	2,02
W <sub>12</sub> (21)	-0,7028	0,50
W <sub>12</sub> (12)	-0,0650	0,94
W <sub>12</sub> (22)	0,0650	1,07
W <sub>12</sub> (13)	-0,4002	0,67
W <sub>12</sub> (23)	0,4002	1,49
W <sub>12</sub> (14)	-0,2376	0,79
W <sub>12</sub> (24)	0,2376	1,27

Für Bestände der Altersklasse II verringert sich ebenfalls der Quotient; die älteren Bestände neigen eher zum Umfallen. Der Einfluß der Köpfung scheint einige Besonderheiten zu zeigen. Ein Wert von 3,22 für  $\exp(w_{1(1)})$  bedeutet, daß geköpftete Bestände anders als zu erwarten eher zum Umfallen neigen als ungeköpftete (0,31). Da offenbar besonders windwurfgefährdete Bestände entwipfelt werden, zeigen diese trotz durchgeführter Köpfung einen höheren Anteil an umgefallenen Beständen. Eine unsachgemäße Durchführung könnte ebenfalls das erhaltene Ergebnis erklären. Diese mathematische Analyse wirft schließlich die Frage auf, ob Wipfelköpfungen überhaupt zur Verringerung des Risikos beitragen.

Als weiterer Einfluß auf den Quotienten wirken schließlich noch Alter und Köpfung zusammen. Junge geköpftete Bestände scheinen leichter zu fallen als ältere. Auch hier kann man das unerwartete Verhalten dadurch erklären, daß man junge Bestände nur dann entwipfelt, wenn das entsprechende Risiko als sehr groß angenommen wird. Diese Bestände würden somit trotz Köpfung eher zum Umfallen neigen.

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

Loglineare Modelle erlauben auch die Beschreibung von Abhängigkeiten zwischen Variablen, die höchstens ordinalskaliert sind. Sie helfen ein besseres Verständnis für Daten zu finden, die in einer mehrdimensionalen Kontingenztafel angeordnet sind.

Am Beispiel einer  $(r \times s)$  - Tafel wird der Modellaufbau erklärt.

Eine Teilklasse von Modellen, sogenannte Logitmodelle, erlauben, ähnlich wie bei der Varianzanalyse, die Beschreibung der Abhängigkeiten einer Variablen mit nur zwei Ausprägungen (alternative Variable) von anderen erfaßten Merkmalen.

Auswahlmechanismen zur Selektion eines Modells werden angesprochen und für eine vierdimensionale Kontingenztafel am Beispiel von Daten aus einer Untersuchung zur Wipfelköpfung erläutert.

## 7. SUMMARY

Loglinear models allow the description of dependences on variables which are ordinal scaled at most. They help to find a better comprehension of the data which are arranged on contingency tables.

The model is explained by the example of a  $(r \times s)$  - table.

A partial class of models, called logit models, allow the description of dependences of one dichotomous variable on other variables.

Model selection algorithms are described and applied to a fourdimensional contingency table.

## 8. LITERATUR

- [1] BISHOP, Y.M.M., FIENBERG, S.E., HOLLAND, P.W. (1975): Discrete Multivariate Analysis : Theory and Practice, MIT Press, Cambridge (Massachusetts) and London.
- [2] FIENBERG, S.E. (1977): The Analysis of Cross-Classified Categorical Data, MIT Press Cambridge (Massachusetts) and London.
- [3] HARTUNG, J. (1985): Statistik, Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik, R. Oldenbourg Verlag München, Wien.
- [4] NORUSIS, M.J. (1985): Advanced Statistics Guide SPSS<sup>x</sup>, McGraw Hill, Chicago.
- [5] ROEDER, A. (1979): Zur Anwendung nichtparametrischer Verfahren im Forstwesen, Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Heft 91, S. 69-74 .

Bisher sind folgende Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz erschienen:

1/1987	Jahresbericht 1984 - 1986 ISSN 0931 - 9662	DM 12.-
2/1987	BLOCK, STELZER: Radioökologische Untersuchungen in Waldbeständen ISSN 0931 - 9662	DM 12.-
3/1987	BLOCK, FRAUDE, HEIDINGSFELD: Sondermeßprogramm Wald (SMW) ISSN 0931 - 9662	DM 12.-
4/1987	BEUTEL, BLOCK: Terrestrische Feldgehölzschadenserhebung (TFGE 1986) ISSN 0931 - 9662	DM 12.-
5/1988	Die Forstliche Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz im Dienste von Wald und Forstwirtschaft - Reden anlässlich der Übergabe des Schlosses Trippstadt als Dienstsitz am 10.04.1987 ISSN 0931 - 9662	DM 12.-
6/1988	Jahresbericht 1987 ISSN 0931 - 9662	DM 12.-
7/1988	BEUTEL, BLOCK: Terrestrische Parkgehölzschadenserhebung (TPGE 1987) ISSN 0931 - 9662	DM 12.-
8/1988	GERECKE: Zum Wachstumsgang von Buchen in der Nordpfalz ISSN 0931 - 9662	DM 30.-
9/1989	Jahresbericht 1988 ISSN 0936 - 6067	DM 12.-
10/1989	HEIDINGSFELD: Verfahren zur luftbildgestützten Intensiv- Waldschadenserhebung in Rheinland-Pfalz ISSN 0931 - 9662	DM 25.-
11/1989	BLOCK, DEINET, HEUPEL, ROEDER, WUNN: Empirische, betriebswirtschaftliche und mathematisch-statistische Untersuchungen zur Wipfelköpfung der Fichte ISSN 0931 - 9662	DM 12.-