

**Einordnung des Wachstums von Buche (*Fagus sylvatica*  
L.) und Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.) im Zeitraum  
zwischen den zwei Bundeswaldinventuren (1987 und  
2002) in den längerfristigen Kontext**

**Inaugural-Dissertation zur  
Erlangung der Doktorwürde  
der Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften  
der Alber-Ludwigs-Universität  
Freiburg i. Brsg.**

**vorgelegt von**

**Karl Tojic**

**Freiburg im Breisgau  
2010**

**Dekan: Prof. Dr. Dr. hc. G. Becker**  
**Referent: Prof. Dr. H. Spiecker**  
**Korreferent: Prof. Dr. Dr. hc. G. Becker**

**Tag der mündlichen Prüfung: 10.12.2010**

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	i
Abbildungsverzeichnis.....	iii
Tabellenverzeichnis .....	iv
Danksagung.....	1
1. Einleitung.....	3
1.1 Problemstellung .....	3
1.2 Hypothesen .....	5
1.3 Allgemeine Informationen zur Bundeswaldinventur.....	6
2. Methoden .....	8
2.1 Datenauswertung.....	8
2.1.1 Radialzuwachs .....	8
2.1.1.1 Standardisierung des Radialzuwachses.....	8
2.1.2 Höhenwachstum als Zeiger für Standortsproduktivität .....	10
2.1.2.1 Verfahren zur Standortproduktivitätsbestimmung.....	10
2.1.2.2. Bestimmung der Änderung der Standortproduktivität.....	12
2.1.2.3. Standardisierung des Höhenwachstums.....	14
2.1.2.4. Analyse der Veränderungen des Höhenwachstums.....	15
2.2 Datengewinnung.....	17
2.2.1. Auswahl der Bäume.....	17
2.2.2. Stammscheibengewinnung .....	18
2.2.3. Stammscheibenpräparation.....	19
2.2.4. Jahrringvermessung .....	20
2.2.5. Höhenanalyse bei Fichte.....	21
2.2.6. Höhenanalyse bei Buche.....	21
3. Material.....	23
3.1 Auswahl der Untersuchungsregionen, der Standorte und der Baumarten .....	23
3.1.1. Flächenschwarzwald (Allgemeines).....	25
3.1.1.1. Standortseinheit Buchen-Tannenwald auf mäßig frischem lehmigem Sand (IS).....	27
3.1.2. Nördliche Ostalb (Allgemeines) .....	28
3.1.2.1. Standortseinheit Elymus-Buchenwald auf mäßig frischem Kalkverwitterungslehm (KVL).....	29
3.1.2.2. Standortseinheit Hainsimsen-Buchen-Wald auf Feuerstein-Schlufflehm (FSchl).....	30
4. Ergebnisse.....	32
4.1 Veränderungen des Radialzuwachses in 1,3m Höhe .....	32
4.2. Analyse des Höhenwachstums bei Fichte.....	39
4.3 Analyse des Höhenwachstums bei Buche.....	48
4.4 Bestätigung des Trends der veränderten Standortsproduktivität .....	49
5. Diskussion.....	51
5.1 Beurteilung des Materials .....	51
5.2 Beurteilung der Methoden .....	53
5.3 Diskussion der Ergebnisse .....	55

5.4. Auswirkungen auf die Forstliche Planung.....	56
6. Zusammenfassung.....	57
7. Summary.....	59
8. Literaturverzeichnis .....	61
9. Anhang.....	66

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beschreibung der Aufnahmen und Scheibentnahme (modifiziert von Gerecke 1988).....	19
Abbildung 2: Übersichtskarte der Wuchsgebiete in Baden- Württemberg(Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg 2008).....	24
Abbildung 3: Mittlere jährliche Radialzuwächse in mm für je drei Altersklassen pro Untersuchungseinheit. Mittlere Alter der Fichten (Zeitpunkt: Jahr 2006) in Altersklasse 1 ist ca. 90 Jahre, in Altersklasse 2 ca. 60 Jahre und in Altersklasse 3 ca. 40 Jahre. Mittlere Alter der Buchen (Zeitpunkt: Jahr 2006) in Altersklasse 1 ist ca. 130 Jahre, in Altersklasse 2 ca. 90 Jahre und in Altersklasse 3 ca. 60 Jahre. ....	33
Abbildung 4: Darstellungen der mittleren h/d Wert Entwicklung der verschiedenen Straten (nicht geglättet).....	34
Abbildung 5: ir/ir standardisiert (arith. Mittel) mit je drei Altersklassen pro Untersuchungseinheit. Das mittlere Alter (Zeitpunkt: Jahr 2006) in Altersklasse 1 ist ca. 90 Jahre, in Altersklasse 2 ca. 60 Jahre und in Altersklasse 3 ca. 40 Jahre.....	35
Abbildung 6: Residuenverteilung der Levakovic III Anpassung der Höhenkurven der Fichten für alle drei Standorte je Altersklasse .....	41
Abbildung 7: Quotient aus dem tatsächlichen jährlichen Höhenwachstumzuwachs und dem vorhergesagte Höhenwachstum (Levakovic III) der verschiedenen Untersuchungseinheiten der Fi zu verschiedenen Jahren. Das mittlere Alter der Fichten (Zeitpunkt: Jahr 2006) in Altersklasse 1 ist ca. 90 Jahre, in Altersklasse 2 ca. 60 Jahre und in Altersklasse 3 ca. 40 Jahre.....	42
Abbildung 8: Quotient aus dem tatsächlichen jährlichen Höhenzuwachs durch den vorhergesagten Höhenzuwachs der ältesten Altersklasse bei gleichem Alter der verschiedenen Untersuchungseinheiten der Fi zu verschiedenen Jahren. Das mittlere Alter der Fichten (Zeitpunkt: Jahr 2006) in Altersklasse 1 ist ca. 90 Jahre, in Altersklasse 2 ca. 60 Jahre und in Altersklasse 3 ca. 40 Jahre. ....	45
Abbildung 9: Die Höhen der Bäume sind für drei konstante Alter über dem jeweiligen Kalenderjahr aufgetragen und durch lineare Regressionen ausgeglichen. ....	50

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die nicht-linearen Wachstumsfunktionen.....	15
Tabelle 2: Eigenschaft der Untersuchungsregion Flächenschwarzwald (Untheim 1996b) .....	26
Tabelle 3: Definition und Eigenschaften der untersuchten Standortseinheit lehmiger Sand (IS) ((Untheim 1996b).....	27
Tabelle 4: Eigenschaft der Untersuchungsregion Nördliche Ostalb (Untheim 1996b) ....	29
Tabelle 5: Definition und Eigenschaften der untersuchten Standortseinheit Kalkverwitterungslehm (KVL) (Untheim 1996b) .....	30
Tabelle 6: Definition und Eigenschaften der untersuchten Standortseinheit Feuerstein-Schlufflehm (FSchl) (Untheim 1996b) .....	31
Tabelle 7: Mittlerer standardisierter Radialzuwachs einer Untersuchungseinheit in verschiedenen gleichlangen Zeiträumen von 1939 bis 2002 und in den Jahren 2003 bis 2006; * = unterscheidet sich signifikant von 1.0 bei $\alpha = 0.05$ .....	36
Tabelle 8: Mittlere standardisierte Radialzuwächse einer Untersuchungseinheit in verschiedenen gleichlangen Zeiträumen von 1939 bis 2002 und im Zeitraum von 2003 bis 2006 verglichen mit dem mittleren Radialzuwachs von 1971 bis 1986; * = unterscheidet sich signifikant von 1.0 bei $\alpha = 0.05$ .....	38
Tabelle 9: Nicht lineares Bestimmtheitsmaß der Höhenregression bei der Fichte nach Levakovic III.....	40
Tabelle 10: Mittlerer Quotient aus dem tatsächlichen Höhenwachstum und dem vorhergesagte Höhenzuwachs (Levakovic III) der verschiedenen Untersuchungseinheiten der Fi in verschieden gleichlangen Zeiträumen von 1939 bis 2002 und im Zeitraum von 2003 – 2006; * = unterscheidet sich signifikant von 1.0 bei $\alpha = 0.05$ .....	43
Tabelle 11: Mittlerer Quotient aus dem tatsächlichen Höhenwachstum und dem vorhergesagte Höhenzuwachs (Levakovic III) der verschiedenen Untersuchungseinheiten der Fi in verschieden gleichlangen Zeiträumen.von 1939 bis 2002 und im Zeitraum von 2003 bis 2006; * = unterscheidet sich signifikant von 1.0 bei $\alpha=0.05$ .....	44
Tabelle 12: Mittlerer Quotient aus dem tatsächlichen Höhenwachstum durch das vorhergesagte Höhenwachstum der ältesten Altersklasse bei gleichem Alter der verschiedenen Untersuchungseinheiten der Fi in verschiedenen gleichlangen Zeiträumen von 1939 bis 2002 und im Zeitraum von 2003 bis 2006; * = unterscheidet sich signifikant von 1.0 bei $\alpha = 0,05$ .....	46
Tabelle 13: Mittlerer Quotient aus dem tatsächlichen jährlichen Höhenzuwachs durch den vorhergesagten Höhenzuwachs der ältesten Altersklasse bei gleichem Alter der verschiedenen Untersuchungseinheiten der Fi in verschiedenen gleichlangen Zeiträumen von 1939 bis 2002 und im Zeitraum von 2003-2006; Zeitraum 1971 - 1986 = 100 %; * = unterscheidet sich signifikant von 1.0 bei $\alpha = 0,05$ .....	47
Tabelle 14: Höhe von Bäumen aus verschiedenen Untersuchungseinheiten bei definierten d1,3-Altern.....	50
Tabelle 15: Residuenplots der linearen Regression zur Bestimmung des Trends zur veränderten Standortsproduktivität.....	66

## Danksagung

Zu aller erst möchte ich meinem Betreuer und Institutsleiter des Instituts für Waldwachstum Prof. Dr. Heinrich Spiecker danken. Er hat mich in der ganzen Zeit mit Rat und Tat, und nicht zu Letzt auch finanziellen Mitteln unterstützt. Ohne seine uneingeschränkte Unterstützung wäre es niemals möglich gewesen ein so umfangreiches Datenmaterial zu sammeln, wovon die Qualität dieser Arbeit stark abhängt.

Mein Dank gilt außerdem allen Kollegen am Institut für Waldwachstum, insbesondere den Assistenten Dr. Hans-Peter Kahle, Dr. Philipp Duncker und Dr. Joachim Langshausen, die immer Zeit gefunden haben wissenschaftliche (und auch nicht wissenschaftliche) Probleme zu diskutieren. Außerdem sollte hervorgehoben werden, dass die Mitarbeiter Clemens Koch, Albert Fehrenbach und Felix Baab, als auch die Mitarbeiter im Sekretariat immer meine Arbeit, als auch die Organisation meiner wissenschaftlichen Hilfskräfte, voll unterstützen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Hans Untheim, der mir erlaubte sein Datenmaterial mit für die Untersuchungen zu benutzen. Durch diese uneigennützigste Geste wurde mir ermöglicht mein Datenmaterial wesentlich zu erweitern, und genauere Aussagen machen zu können.

Außerdem möchte ich hierbei allen Verantwortlichen des RP6 Projektes EFORWOOD danken, welches mir die Möglichkeiten der Forschung bereitstellte, und für welches die Ergebnisse für die Erstellung und Auswertungen von zukünftigen Szenarien hilfreich sein können. Insbesondere möchte ich Dr. Jürgen Zell von der Forstlichen Versuchsanstalt Freiburg danken, mit dem ich oft wissenschaftliche Diskussion führen konnte.

Mein besonderer Dank gilt den verantwortlichen Mitarbeitern und besonders den Landräten der Landratsämter Freudenstadt, Calw, Ostalbkreis und Heidenheim, die es mir ermöglichten das umfangreiche Probenmaterial kostenfrei während des laufenden

Betriebes zu sammeln. Ich möchte hierbei auch allen Förstern und Waldarbeitern danken, die mich bei den Außenaufnahmen begleitet und unterstützt haben.

Bedanken möchte mich auch bei meinem jetzigen Arbeitgeber McKinsey & Company in Stockholm, die mir durch Ihre Unterstützung und Flexibilität die Möglichkeit gaben, meine Dissertation abzuschließen.

Außerdem möchte hier meinem Korreferenten Herrn Prof. Dr. Dr. hc. Gero Becker danken, dass er sich die Zeit nimmt, sich meiner Arbeit zu widmen.

Zum Schluss möchte ich meiner Familie danken. Ohne die Unterstützung meiner Frau Laisha, und die Geborgenheit mit meinen Kindern Nadia und Daniel, wäre es mir nicht möglich gewesen mich auf eine so schwierige und langwierige Reise zu begeben. Zusammen mit meinen Eltern haben sie immer an mich geglaubt, und ohne die Unterstützung meiner Eltern als auch meiner Frau wäre ich heute nicht dort wo ich jetzt bin.

Ihnen alle: Vielen Dank!

# 1. Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Die Ergebnisse der zweiten Bundeswaldinventur im Jahre 2002 erlaubten zum ersten Mal das Wachstum der Baumarten zwischen den Jahren 1987 und 2002 auf großer Fläche zu messen. Dabei ergab sich zum Beispiel in Baden-Württemberg ein durchschnittlicher Gesamtzuwachs (dGz) von 16,71 m<sup>3</sup>/ha/a für die Fichte und 11,95 m<sup>3</sup>/ha/a für die Buche (BMELV 2008) für diesen Zeitraum. Noch vor wenigen Jahren wären Bestände, die einen so hohen dGz erreichen, als äußerst produktiv angesehen worden, obwohl diese Zuwächse in der Periode von 1987 bis 2002 nur als durchschnittlich anzusehen sind.

Da es bisher nur eine Wiederholungsinventur gab, besteht nicht die Möglichkeit die Zuwächse mit vorangegangenen Perioden zu vergleichen. Die entscheidende Frage, die sich stellt, ist, ob diese hohen Zuwächse nachhaltig in der Zukunft zu erwarten sind, oder ob diese von kurzfristigen Phänomenen getrieben wurden. Kahle et al. (2008) zeigten, dass sich die Standortsproduktivität langfristig und nachhaltig durch erhöhten Stickstoffeintrag und andere anthropogene Einflüsse verbessert, was sich in einem gesteigerten Höhenwachstum widerspiegelt (Unthelm 1996a). Dieser stetige Anstieg jedoch kann offensichtlich nicht die Folge einer plötzlichen Veränderung sein. Im Gegensatz dazu kann die Variabilität des Klimas bzw. der Witterung durch kurzfristige Änderungen Ursache abrupter Veränderungen im Ökosystem Wald sein. Ein guter Weiser für Einflüsse kurzfristiger klimatischer Ereignisse ist das Dickenwachstum (Schweingruber 1993).

Die hier vorgestellte Arbeit hat zum Ziel das Wachstum von Buche und Fichte auf ausgewählten Standorten in der Periode von 1987 bis 2002 mit dem Wachstum in der Vergangenheit zu vergleichen. Das methodische Ziel der Arbeit ist es belastbare Methoden zur Berechnung der Erwartungswerte der untersuchten Straten für die Periode zwischen den beiden Bundeswaldinventuren zu entwickeln, die am Ende der Betrachtungszeit liegt. Durch die Natur der vielfältigen Modellanpassungsmöglichkeiten

von Daten (Regression, Splines, etc.) ergibt sich das Problem, dass es gerade am Ende der Zeitmessreihen zu Anpassungsschwierigkeiten kommt, die es verhindern genaue Prognosen machen zu können, bzw. die Ergebnisse der letzten analysierten Periode in einen längeren Kontext einzuordnen. Dieses Problem verändert sich kaum durch wiederholte Inventuren, da gerade die letzte Periode für Prognosen von besonderer Bedeutung ist. Aber genau in dieser Periode entstehen bei Regressionen oft systematische Fehler, die nicht alleine quantitativ verhindert werden können. Neben dem beschriebenen End-fit Problem ist bezüglich der Prognosefähigkeit auch der Einfluss des Modellierungsansatz zu berücksichtigen (z.B. empirischer oder prozessbasierter Ansatz). Es sind komplexe Zusammenhänge die entscheiden, ob ein Phänomen als kurzfristig oder langfristig einzuordnen ist, und somit in die Anpassung einfließen sollte oder nicht. Durch die Einbeziehung von physiologischem Wissen ist es aber in manchen Fällen möglich qualitativ zu beurteilen, ob eine Methode das tatsächliche langfristige Wachstum innerhalb eines kurzen bzw. mittelfristigen definierten Zeitraums überschätzt oder unterschätzt. Bäume als Lebewesen haben einen charakteristischen Wachstumsverlauf bei solitären aber auch bei vorherrschenden Bäumen ohne starke Konkurrenzeinflüsse (siehe Abetz 1976). Nach einer kurzen Initiierungsphase steigt das Höhenwachstum in der Jugend steil an, bis es ein Maximum im jungen bzw. mittleren Alter erreicht. Danach bleibt es auf dem Niveau nur kurz und fängt langsam an wieder zu fallen. Dies ist jedoch eine vereinfachte (aber anerkannte) Modellvorstellung, die davon ausgeht, dass sich die exogenen Faktoren nicht verändern. In Wirklichkeit ist es aber ein sehr komplexes System mit sich andauernd veränderten Faktoren. Die Temperaturen und der Niederschlag (siehe Rapp und Schönwiese 1996) aber auch Faktoren wie der Standort sind im Wandel. Fakt ist, dass der CO<sub>2</sub> Gehalt in der Luft (Hofmann et. al 2008), aber auch der Stickstoffeintrag in vielen Wäldern Mitteleuropas (siehe Spiecker 1999) ansteigt, was nachhaltig dieses Ökosystem verändert. Physiologische Zusammenhänge ändern sich mit dem Ökosystem. Bereits Eriksson und Johansson (1993) beschrieben erste Hinweise auf veränderte Wachstumsabläufe, insbesondere ein früheres Erreichen des Kulminationszeitpunkts.

Daher ergibt sich zwangsläufig, dass es nicht einen einzigen, unveränderlichen Erwartungswert gibt. Dies wird durch sich mehrere überlagernde Trends sogar noch erschwert. Zum Beispiel ist der Alterstrend des Höhenzuwachses eines Baum entgegengesetzt gerichtet zu dem globalen Trend der Steigerung der Standortsproduktivität (Tojic 2008). Es ist daher kaum möglich einen Trend in einer unechten Wuchsreihe zu bestimmen, ohne Kenntnisse über Auswirkungen der anderen Einflüsse zu berücksichtigen. Es wird in der Studie gezeigt, dass schon das Wissen über die Ausrichtung des Trends ausreichend sein kann, um Schätzungen der Erwartungswerte qualitativ interpretieren zu können.

Das angewandte Ziel der Arbeit ist das Höhenwachstum und Dickenwachstum im Zeitraum zwischen den beiden Bundeswaldinventuren zu analysieren. Da das Höhenwachstum als Zeiger von Standortsproduktivität (Assmann 1961) und das Dickenwachstum als Zeiger von eher kurzfristigen klimatischen Phänomenen (Schweingruber 1993) angesehen werden kann, soll in dieser Arbeit überprüft werden, wie sich diese beiden Wachstumsgrößen während des Zeitraums zwischen den beiden Bundeswaldinventuren im Vergleich zu deren Erwartungswerten verhalten haben. Es soll gezeigt werden, ob das Höhenwachstum bzw. das Dickenwachstum zwischen den Jahren 1987 und 2002 von bisherigen Durchschnittswerten abweicht.

## **1.2 Hypothesen**

Die Hypothese der folgenden Arbeit ist, dass das Wachstum der Bäume zwischen den beiden Bundeswaldinventuren von 1987 bis 2002 als überdurchschnittlich einzuordnen ist, und dass diese Änderungen als vorübergehend (kurz bis mittelfristig) einzustufen sind. Dies wird anhand von Fallstudien untersucht, welche nur für die untersuchten Straten repräsentativ ist. Um diese Hypothese operabel zu machen und sie untersuchen zu können, wird sie in folgenden Teilhypothesen unterteilt:

- Der Trend zur Verbesserung der Standortsproduktivität hat sich nicht grundlegend verändert, und kann durch einen, aber nicht ausschließlich, linearen Trend erklärt werden.
- Der Radialzuwachs wird als Zeiger für kurzfristige (oft witterungsbedingte) Änderungen genutzt. Es soll gezeigt werden, dass sich der Radialzuwachs in der Periode zwischen den zwei Bundeswaldinventuren auf einem überdurchschnittlichen hohen Niveau befand.
- Der Höhenzuwachs wird als Zeiger für langfristige Veränderungen der Standortsproduktivität genutzt. Es soll gezeigt werden, dass sich das Höhenwachstum im Zeitraum zwischen den zwei Bundeswaldinventuren auf einem durchschnittlichen Niveau befand.

Die Summe der Ergebnisse aus der Bearbeitung der einzelnen Teilhypothesen wird zuletzt genutzt, um eine qualitative Beurteilung der Zuwachsniveaus zu machen. Durch die Unterteilung der Hypothese in die drei vorher diskutierten Teilhypothesen soll gezeigt werden, dass die Wahrscheinlichkeit besteht, dass die berechneten Zuwächse, die auf den Messungen der zwei Bundeswaldinventuren basieren, eventuell das langfristige Wachstumspotential der Baumarten überschätzen.

### **1. 3 Allgemeine Informationen zur Bundeswaldinventur**

Daten aus den beiden Bundeswaldinventuren dienen nicht als Grundlage für diese Arbeit. Die Bundeswaldinventur ist ein aufwendiges Verfahren von repräsentativen Inventuren, während in dieser Arbeit einzelne Fallstudien analysiert werden. Anstatt dessen, werden die Ergebnisse in der Diskussion in Relation zu den Ergebnissen aus den Bundeswaldinventuren gesetzt, um nachher qualitative Aussagen über das Niveau der Zuwächse in dem analysierten Zeitraum machen zu können. Ein quantitativer Vergleich

ist auf Grund der notwendigen Menge der Messungen, als auch dem Stichprobendesign, nicht möglich.

Die Bundeswaldinventur ist eine gesamtdeutsche Großrauminventur, die von Bundesebene organisiert wird, jedoch auf Landesebene durchgeführt wird. In den alten Bundesländern wurde 1987 die erste Inventur durchgeführt, während in den neuen Bundesländern die ersten Messungen 2002 gemacht wurden. Die Stichproben liegen auf den Schnittpunkten eines Bundesweiten 4 km x 4 km Quadratverband.

Die durchschnittlichen jährlichen Zuwächse, die sich aus den beiden Bundeswaldinventuren (1987-2002) ergaben, sind größer als eine Vielzahl der Waldwachstumskundler erwartet hätte. Der durchschnittliche jährliche Zuwachs, über alle Altersklassen hinweg, liegt für Buche in Baden-Württemberg bei 11,95 m<sup>3</sup>/ha\*a, für Fichte bei 16,71 m<sup>3</sup>/ha\*a (BMELV 2008). Diese hohen Zuwächse wären in der Vergangenheit noch als extrem wüchsig angesehen worden, wobei sie für den Zeitraum 1982 bis 2002 als Durchschnittswert beschrieben werden. Die unerwartet hohen Zuwachswerte waren der Anlass für diese Studie. In Fallstudien soll näher untersucht werden, ob dieser hohe Zuwachs zwischen den beiden Bundeswaldinventuren als eher kurzfristig anzusehen ist, oder als langfristige Änderungen zu betrachten ist.

## 2. Methoden

### 2.1 Datenauswertung

#### 2.1.1 Radialzuwachs

Da der Einfluss von sich verändernden Konkurrenz- bzw. Dichtesituationen durch die Auswahl von vorherrschenden Bäumen, und unter Berücksichtigung der Bestandesentwicklung, so weit wie möglich minimiert wurde, wird in der hier vorliegenden Studie der Radialzuwachs als Zeiger für kurzfristige klimatische (bzw. Witterungs-) Phänomene analysiert (Spiecker 1995). Natürlich haben auch der Standort bzw. dessen Veränderungen Auswirkungen auf den Radialzuwachs, jedoch geschehen diese (zumindest in dieser Studie, wo zum Beispiel die Analyse von gedüngten Flächen vermieden wurde) eher langfristig und graduell, was wenig Auswirkungen auf die Analysierbarkeit einer bestimmten kurzfristigen Periode mit sich bringt.

##### 2.1.1.1 Standardisierung des Radialzuwachses

In Fällen bei denen Fichten keinen Rückgang des Radialzuwachses mit zunehmendem Alter zeigen, müssen modifizierte Analysemethoden angewendet werden. Dieses unerwartete Ergebnis ist wahrscheinlich auf die Bedingungen in den neunziger Jahren zurückzuführen, und wurde auch schon von anderen Wissenschaftlern diskutiert (Yue und Kohnle 2009). Es entspricht der gängigen Lehrmeinung, dass der Radialzuwachs von Bäumen physiologisch begründet nach einem Höhepunkt in den jungen Jahren mit weiter zunehmendem Alter abnimmt (siehe Assmann 1961). Es scheint unwahrscheinlich, dass ein positiver Trend nachhaltig anhält, jedoch ist es denkbar, dass auf Grund einer nachhaltigen Veränderung der Wachstumsbedingungen Verschiebungen im Alterstrend ergeben. Dies könnte zum Beispiel zur Folge haben, dass der maximale Radialzuwachs bei einem späteren Baumalter erreicht wird, und dass der anschließende Abfall nicht so stark ausgeprägt ist. Da unter den diskutierten Bedingungen eine Anpassung an einen

positiven Alterstrend auch im hohen Alter zu Folge haben würde, welcher nicht physiologisch stringent erklärt werden kann, wurde auf eine Trendbereinigung des Alterstrends bei Fichte verzichtet. Eine mögliche Erklärung könnten die Ergebnisse von Becker et al. (1994) sein. Dort wurde gezeigt, dass der globale Wachstumstrend nicht nur die Höhenzuwächse (siehe Unthelm 1996b; Spiecker 1999) sondern auch die Radialzuwächse steigert, was auch schon als Folge von Düngungen bekannt ist (Spiecker 1987). Möglicherweise wird der Alterstrend des Radialzuwachses der Fichten durch erhöhten Stickstoffeintrag, in Kombination mit stärkerer Freistellung der Bäume modifiziert. Die folgende Studie hat nicht zur Aufgabe die langfristigen Auswirkungen der globalen Steigerung der Standortsproduktivität auf den Radialzuwachs zu bestimmen. Deswegen wird nur die Summe aus Alterstrend und Steigerung der Standortsproduktivität betrachtet, die beide entgegengesetzt gerichtet sind.

In Fällen, wo kein negativer Alterstrend nachweisbar ist, wird auf die Standardisierung zur Entfernung des Alterstrends des Radialzuwachses verzichtet, und somit mit dem Mittelwert standardisiert. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf einem Zeitraum von 15 Jahren. Innerhalb eines so kurzen Zeitraums sind die altersbedingten Veränderungen des Radialzuwachses gering. Mit dem Hintergrundwissen, dass physiologisch mit steigendem Alter ein sinkender Radialzuwachs zu erwarten wäre, kann man daher die Schätzungen des erhöhten Radialzuwachses im Zeitraum zwischen den beiden Bundeswaldinventuren als konservative Schätzung ansehen.

## 2.1.2 Höhenwachstum als Zeiger für Standortsproduktivität

### 2.1.2.1 Verfahren zur Standortproduktivitätsbestimmung

Es gibt mehrere verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Standortproduktivität, welche in folgende Klassen aufgeteilt werden können (siehe Untheim 1996b):

1.1 Direkte Bestimmung der Standortproduktivität über waldwachstumskundliche Messgrößen und sonstige Eigenschaften der Vegetation

1.1.1 Verfahren 1: Beziehung  $GWL_V = f(\text{Alter})$

1.1.2 Verfahren 2: Beziehung  $h = f(\text{Alter})$

1.1.3 Verfahren 3: Beziehung  $V_{BB} = f(\text{Alter})$

1.1.4 Verfahren 4: Beziehung  $d = f(\text{Alter})$

1.1.5 Verfahren 5: Beziehung  $h = f(d)$

1.1.6 Verfahren 6: Vergleichsbeziehung zwischen Baumarten

1.1.7 Verfahren 7: Kraut und Strauchschicht der Vegetation

1.2 Indirekte Bestimmung der Standortproduktivität über Standortfaktoren

1.3 Dynamische Bonitierung zur Bestimmung der Standortproduktivität

Die direkte Bestimmung der Standortproduktivität (und deren Verlauf in der Vergangenheit) ist über waldwachstumskundliche Messgrößen nur durch bestandesbezogene (oder kollektiv) Werte möglich, da zum Zeitpunkt der Messungen vorhandenen einzelne Individuen nicht die Entwicklungen des Bestandes in Bezug auf Mortalität, Durchforstung und Einwuchs widerspiegeln (Spiecker 1992).

Verfahren 1 kann nicht auf echte Wuchsreihen angewendet werden, da nur auf wenige Einzelfälle beschränkt Daten von mehreren Generationen am selben Ort vorhanden sind. Bei unechten Wuchsreihen, die laut Assmann (1955) als „Zusammenfassung von Beständen auf gleichen und ähnlichen Standorten, für welche ein übereinstimmender Wuchsablauf nachgewiesen ist“ definiert sind, wird die zeitliche Variation durch eine

räumliche Variation ersetzt. Hier werden also „vergleichbare“ Bestände in verschiedenen Altern auf verschiedenen Flächen zu einem Zeitpunkt miteinander verglichen. Eidmann (1961) kritisiert an unechten Wuchsreihen, dass klimatisch bedingte Standortsänderungen zu Fehlern führen können. Laut Unthelm (1996b) wird in den meisten Untersuchungen jedoch Verfahren 1 aus Verfahren 2 ( $h = f(\text{Alter})$ ) und einer baumartenspezifischen Beziehung ( $\text{GWL}_V = f(h)$ ) hergeleitet. In seiner Arbeit konnte er nachweisen, dass in seinen Fallstudien diese Beziehung sich über die Zeit nicht veränderte. Dies kann interpretiert werden, dass die Bäume auf einem Standort bei gleichem Alter und Höhe dasselbe Volumen geleistet haben. Dies gilt unter der Annahme, dass sich Saatgutherkunft, Art der Bestandesbegründung, Bestandespflege, Düngungen, Schäden, und Sondernutzungen (z.B. Streunutzung) nicht innerhalb einer unechten Wuchsreihe unterscheiden (siehe auch Moosmayer 1970; Mitscherlich 1959). Verfahren 2 ( $h = f(\text{Alter})$ ) ist die Grundlage zur Höhenbonitierung (siehe Clutter et al. 1983, Husch et al. 1982 und Grey 1989). Auf der Grundlage von Bonitätsfächern, kann die Gesamtwuchsleistung im Nachhinein ermittelt werden (siehe Carmean 1975 und Hasenauer et al. 1994).

Verfahren 3 ( $V_{bb} = f(\text{Alter})$ , und auch Verfahren 4 ( $d = f(\text{Alter})$ ) und Verfahren 5 ( $h = f(d)$ ) sind für die diese Studie nicht anwendbar, da Pflegemaßnahmen (besonders Durchforstungen) starken Einfluss auf das Volumen des verbleibenden Bestandes haben, und es dadurch begrenzt möglich ist standortspezifische Einflüsse von Konkurrenzeinflüssen zu unterscheiden, insbesondere wenn nur limitierte Konkurrenzinformationen vorhanden sind.

Verfahren 6 (Vergleichsbeziehungen zwischen Baumarten) ist für diese Studie nicht geeignet, da es normalerweise nur genutzt wird, wenn die Baumart noch nicht auf dem Standort vorkommt (siehe Clutter et al. 1983).

Verfahren 7 (Kraut und Strauchschicht der Vegetation) nutzt Zeigerpflanzen für die Bonitierung (siehe Clutter et al. 1983, Niepolla 1993 und Spurr und Barnes 1992). Es ist in der Regel weniger genau als Verfahren 2.

Die indirekte Bestimmung der Standortproduktivität über Standortfaktoren greift oft bei der Modellbildung auf die oben genannten Verfahren der Bestimmung der

Standortproduktivität zurück (siehe z.B. Kahn 1994, Moosmayer und Schöpfer 1972, und Röhe 1985). Es ist daher kein eigenständiges Verfahren.

Die dynamische Bonitierung ist schließlich ein Verfahren zur direkten Bestimmung der Standortproduktivität (siehe z.B. Speidel 1972, Abetz 1952 und Moosmayer 1961). Da sie aber die Veränderung der Standortproduktivität mit in die Bonitierung einfließen lässt, ist sie für diese Studie nicht geeignet, da gerade die Veränderungen in einem getrennten Schritt analysiert werden.

Aus den oben angeführten Gründen wird in dieser Studie Verfahren 2 (Beziehung  $h = f(\text{Alter})$ ) als Schätzer für die Standortproduktivität angewendet. Eine Annahme in dieser Arbeit ist, dass sich die Behandlung bzw. Konkurrenzsituation der vorherrschenden Bäume nicht grundlegend geändert hat, und sich deshalb nicht auf die Höhenentwicklung ausgewirkt hat. Dieses Thema wird im späteren Verlauf noch mehr bei der Diskussion der  $h/d$  Werte diskutiert.

### **2.1.2.2. Bestimmung der Änderung der Standortproduktivität**

Entgegen der früheren Meinung haben Standorte keine konstanten Eigenschaften. In der Vergangenheit sprach man vom „Aktualitätsprinzip“, welches von einer Konstanz des Standorts und des sich hieraus ergebenden Waldwachstums ausgeht. Jedoch sind die Standorte u.a. verändertem Klima, einer sich immer weiter erhöhenden  $\text{CO}_2$  Konzentration (Hofmann et al. 2008), und Stickstoffeinträgen (Spiecker 1999) ausgesetzt, welche den Standort und mit ihm das Waldwachstum verändern. Diese Änderungen des Wachstums können zum Nachweis von Änderungen der Standortproduktivität dienen, falls Sie nicht von anderen nicht standortspezifischen Faktoren beeinflusst werden (Pflegemaßnahmen, Düngung, Änderung der Nutzungsstrategien (Vollbaumernte, Streunutzung, etc.) siehe Untheim 1996b). Untheim (1996b) definiert eine Wachstumsänderung in Anlehnung an Spiecker (1994) als eine langfristige Abweichung von einem mittleren Niveau. Langfristig wird dabei als mehrere Jahrzehnte andauernde Abweichung vom zu erwartenden Wachstum festgelegt. Dies hat zur Folge, dass eine

Analyse von Veränderungen mindestens mehrere Jahrzehnte andauernde Zeiträume beinhalten muss. Durch Genetik und waldbaulichen Maßnahmen verursachte Veränderungen sind von standortsbedingten Veränderungen zu unterscheiden.

Für den Wachstumsvergleich gibt es mehrere Konzepte (Unthelm 1996b):

1. Wachstumsvergleich aufeinanderfolgenden Bestandesgenerationen
2. Wachstumsvergleich von Baumindividuen oder Kollektiven mit unterschiedlichen Keimdaten auf ausgewählten Standortseinheiten
3. Wachstumsvergleich mit Modellen
4. Kombination von Verfahren zur Bestimmung der Standortproduktivität mit Methoden zur Quantifizierung ihrer Veränderung

Konzept 1 (Wachstumsvergleich aufeinanderfolgenden Bestandesgenerationen) benötigt Daten von mindestens zwei Generationen am selben Ort (siehe auch Kenk et al. 1991, Wiedemann 1925, Moosmayer 1957, Skovsgaard und Henriksen 1996), welche nur in seltenen Fällen zur Verfügung stehen. Diese Daten stammen meist von Versuchsflächen und standen für diese Untersuchung nicht zur Verfügung.

Im Gegensatz vergleicht Konzept 2 (Wachstumsvergleich von Bauindividuen oder Kollektiven mit unterschiedlichen Keimdaten auf ausgewählten Standortseinheiten) das Wachstum von Individuen oder Kollektiven auf einem ausgewählten Standort. Hierbei ist es notwendig dass die untersuchten Standorte mindestens zu einem Zeitpunkt im Beobachtungszeitraum identisch sind (Spiecker 1994). Es eignen sich hierbei auch regionale Einheiten mit einer Vielzahl von Standorten (siehe Becker 1989, Badeau et al. 1996; Hornbeck et al. 1988, Schadauer 1996), wobei hier das Risiko besteht, dass ältere Bestände systematisch geringere Bonitäten aufweisen. Diese Vermutung wird dadurch erklärt, dass auf schlechteren Bonitäten Bäume mehr Zeit benötigen um bei einer Zieldurchmesserernte entnommen zu werden, und dass zum Beispiel dadurch bei der Entwicklung der Ertragstafeln die älteren Altersklassen überrepräsentiert waren.

Die Baumwahl sollte sich auf vorherrschende and herrschende Bäume beschränken, die auch zeitlebens vorherrschend und herrschend waren, um den Einfluss von der

Bestandesdichte auf das Wachstum zu minimieren. Es darf keine Genetikveränderung im Untersuchungszeitraum stattgefunden haben, und die Behandlungsregime (Durchforstungen) dürfen sich nicht maßgeblich verändert haben.

Konzepte 3 und 4 sind stark behandlungsabhängig ( $V_{bb} = f(\text{Alter})$  bzw.  $d = f(\text{Alter})$ ) (siehe S. 10), und zeigen eine geringe Korrelation mit dem Standort.

Auf Grund der oben diskutierten Situation ist es sinnvoll Konzept 2 innerhalb dieser Studie für die Bestimmung der Änderung der Standortproduktivität

### 2.1.2.3. Standardisierung des Höhenwachstums

Es wurden unechte Höhenwuchsreihen aus den Subpopulationen (Altersklassen der einzelnen Standortseinheiten der einzelnen Baumarten) gebildet. Da die Altersdifferenz innerhalb einer Altersklasse geringfügig ist (max. 20 - 30 Jahre) wurde auf eine Trendbereinigung des globalen Trends der Steigerung der Standortproduktivität innerhalb einer Altersklasse verzichtet. Die Entwicklungen der einzelnen Bäume (Höhenentwicklung und h/d-Entwicklung) wurden als Evaluationskriterium der Daten in Bezug auf Ausreißer herangezogen. Auf diese Weisen sollten z.B. Umsetzer, d.h. soziale Auf- oder Absteiger identifiziert werden.

Danach wurden mehrere Regressionen (Chapman-Richards, Levakovic III und Weibull; siehe in Zeide (1993) an die Höhenwuchsreihen der Fichtensubpopulationen angepasst, um die Höhenwuchsreihen von kurzfristigen Trends zu bereinigen, und um zusätzlich den Alterstrend durch Standardisierung entfernen zu können. Für eine Übersicht über die verwendeten nicht-linearen Wachstumsfunktionen siehe Tabelle 1. Die Prognosefähigkeit der modellierten Wachstumsfunktionen wurde auf End-fit und Einfluss des Modellierungsansatzes analysiert.

Tabelle 1: Übersicht über die nicht-linearen Wachstumsfunktionen

$y$  = Baumhöhe  
 $t$  = Baumalter  
 $y'$  = Höhenzuwachs  
 $a, b, c$  = geschätzte Parameter

Funktion	Integralform	Differentialform
Chapman-Richards	$y = a(1 - e^{-bt})^c$	$y' = abce^{-bt}(1 - e^{-bt})^{c-1}$
Levakovic III	$y = a(t^2 / (b + t^2))^c$	$y' = 2bcy / t(b + t^2)$
Weibull	$y = a(1 - e^{-bt^c})$	$y' = abct^{c-1} e^{-bt^c}$

Die Residuen wurden okular auf Autokorrelation überprüft. In Fällen, wenn ein Trend bzw. Muster in den Residuen erkennbar ist, kann mit einem Durbin-Watson Test die Autokorrelationen weiter analysiert werden.

Diese Arbeit beschränkt sich auf Regressionen, die physiologisch erklärt werden können. Splines und ähnlichen Anpassungen kann man zwar gut auf die Daten anpassen, aber nur selten physiologisch erklären. Es stellt sich dann die Frage, ob zum Beispiel manche Wendepunkte in einem Spline zu erwarten sind, oder ob die Regression den Daten zu stark gefolgt ist. Da in dieser Arbeit das Höhenwachstum mit Erwartungswerten verglichen wird, müssen diese auch nachvollziehbar sein. Diese Voraussetzung war mit Splines nicht zu erfüllen.

#### 2.1.2.4. Analyse der Veränderungen des Höhenwachstums

Die standardisierten Höhenkurven der Einzelbäume erlauben eine Analyse des Höhenwachstums für verschiedene Kalenderjahre. Dabei ist es möglich den Quotienten aus dem tatsächlichen Höhenwachstum und dem zu erwartenden Höhenwachstum (aus der statistischen Anpassung bei der Standardisierung) als beschreibende Variable, welche altersunabhängig ist, des Höhenwachstums zu analysieren. Es wurden unechte Wuchsreihen gebildet, da selbst innerhalb eines Stratum (z.B. junge Fichten) noch kleine

Altersunterschiede vorhanden sind, die nur durch Standardisierung homogenisiert werden können.

Zur Analyse des Höhenwachstums in verschiedenen Perioden wurde dann der Mittelwert aller Quotienten eines Stratums in einer Periode gebildet, und mit der gesamten Lebenszeit und der vorherigen Periode verglichen.

## **2.2 Datengewinnung**

### **2.2.1. Auswahl der Bäume**

Es wurde jeweils nur ein Baum pro Bestand ausgewählt, um räumliche Korrelationen zwischen den Probestämmen zu minimieren. Die Bestände wurden mit Hilfe eines systematischen Rasters ausgewählt, welches über die Untersuchungsregion gelegt wurde, und die Region in Blöcke unterteilt. Die Kombination von Blockstichprobe und systematischer Stichprobe gewährleistet eine höhere Repräsentativität einer flächenhaft verteilten Population bei gleichem Stichprobenumfang als eine rein zufällige Stichprobe (Unthelm 1996b).

Untersucht wurden nur Reinbestände mit weniger als 10 % Beimischung. Jede mögliche Kombination aus Baumart und Standort ist dabei als eigenständige Population anzusehen. Für jede Population wurden 3 Altersklassen untersucht, die aufgrund des Trends der Steigerung der Standortsproduktivität als Subpopulation angesehen werden können. Die Spreitung innerhalb der Altersklassen erlaubt es dabei auch unechte Wuchsreihen bilden zu können, da ein großer Teil der Altersentwicklung davon abgedeckt wird. Um den Einfluss von waldbaulichen Maßnahmen auf das Wachstum der Bäume zu verringern, wurden vorherrschende Bäume ausgewählt, deren Reaktionsmuster weniger durch die Konkurrenz beeinflusst wird, als das von sozial schwächeren Bäumen (Abetz 1983). Zusätzliche Anforderungen an die Probestämme waren, dass sie aus geschlossenen Bestandesteilen derselben Baumart kommen mussten, wipfelschäftig, vital und unverletzt sein mussten, und mindestens eine Baumlänge von Fahrstraßen und Waldwegen entfernt sein mussten. Weitere Kriterien waren die Anzahl und Dimension lebender und abgestorbener Äste (Abetz 1985), die Kronenlänge und Form (mind. 40 % grüne Krone) (Spiecker 1986) und der h/d Wert (Abetz 1976).

In einer Pilotstudie wurde der notwendige Stichprobenumfang berechnet, um statistisch gesicherte Mittelwerte für die Altershöhenbeziehung erlangen zu können. Dazu wurden Ergebnisse von Unthelm (1996b) verwendet. Im Rahmen dieses Projektes wurden 1993-1995 ca. 150 Bäume geprobt. Diese Aufnahme wurde 2006 im Rahmen der hier

vorgestellten Studie wiederholt, und nochmals 150 Bäume aus denselben Beständen vermessen. Im Falle, dass ein Bestand bereits zuvor geerntet war, oder durch waldbauliche Veränderungen nicht mehr den Anforderungen der Studie entsprach, wurde der nächstliegende Bestand, der die Anforderungen erfüllte, gewählt. Dies war bei 6 Bäumen erforderlich. Die restlichen Bäume stammen aus denselben Beständen, die von Unthelm (1996b) für seine Auswertungen herangezogen worden sind.

### **2.2.2. Stammscheibengewinnung**

Nach der Fällung der Bäume wurden Stammscheiben aus mehreren festgelegten Schafthöhen entnommen (siehe Abbildung 1). Um die Analysierbarkeit der Scheiben zu gewährleisten ist es unbedingt notwendig, dass die Querschnittsfläche frei von Ästen oder anderen Störungen ist, die Einflüsse auf das Dickenwachstum an dieser Stelle haben. Deswegen werden die Scheiben immer aus der Mitte zwischen zwei Astquirlen entnommen, wodurch, die vorgegebenen Höhen nicht genau eingehalten werden können. Dies hat zur Folge, dass die Entnahmehöhe zum Beispiel verschiedener S<sub>2</sub>-Scheiben, die eine Standardentnahmehöhe von 6,40 m haben, sich im Mittel um 6,40 m bewegen, aber in Einzelfällen bis zu mehreren Dezimetern davon abweichen können. Da sich das Dickenwachstum innerhalb von ein paar Dezimetern Schafthöhe nicht maßgeblich verändert, ist diese Veränderung geringer als der Einfluss eingewachsener Äste und deshalb zu bevorzugen.

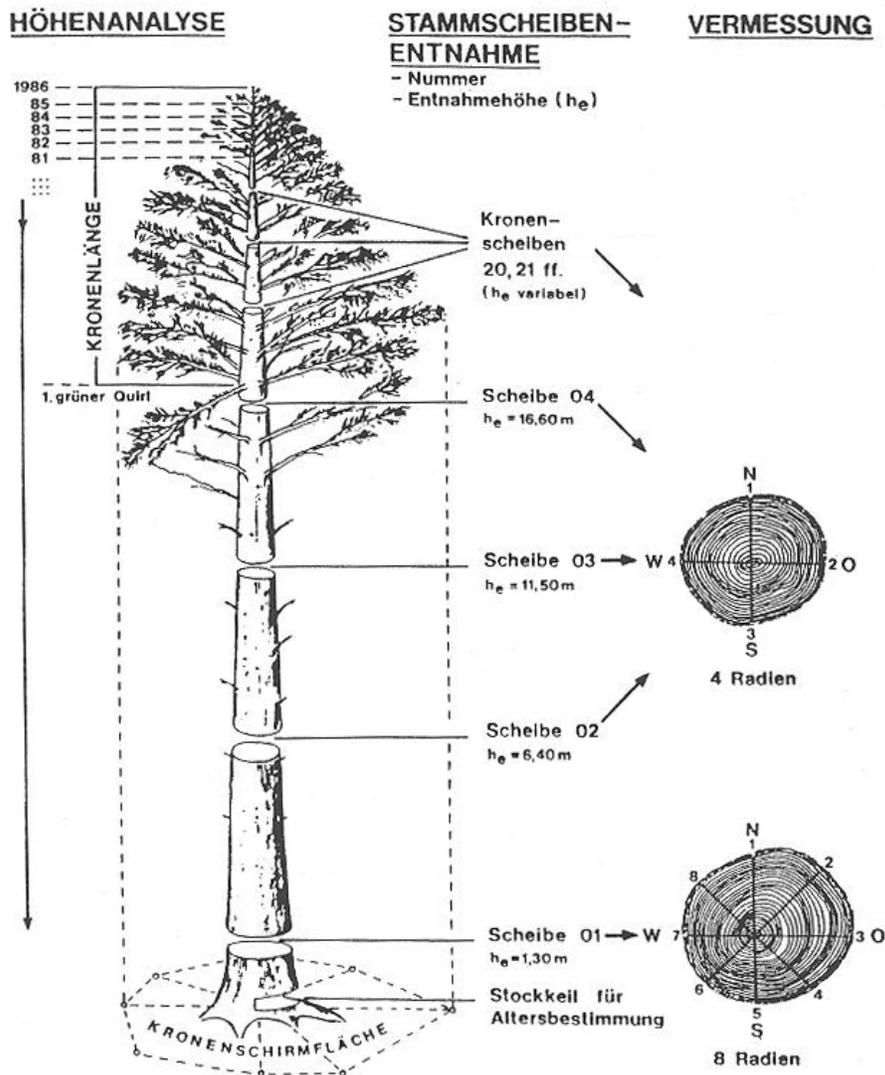


Abbildung 1: Beschreibung der Aufnahmen und Scheibentnahme (modifiziert von Gerecke 1988).

### 2.2.3. Stammscheibenpräparation

Die gesammelten Stammscheiben wurden nach der Gewinnung in der Trockenkammer des Instituts für Waldwachstum langsam getrocknet, um Risse zu vermeiden, die die Vermessung erschweren. Damit keine unkontrollierten Risse bei der Trocknung auftreten, und die Scheiben beschädigen, wurde ein Radialschnitt mit einer Kreissäge bei größeren Scheiben vorgenommen, der die Schrumpfung der großen Scheibe auf diese

Stelle konzentriert, und dadurch weitere Risse vermeidet. Da dieser Schnitt radial ausgerichtet ist, hat er keine Einflüsse auf die Analysierbarkeit des Radialzuwachses.

Nach der Trocknung wurden die Oberseiten der Scheiben mit einem Bandschleifer geschliffen. Dabei wird zuerst 40er Schleifpapier verwendet, und mit 120er Schleifpapier nachgeschliffen, um eine saubere Oberfläche ohne störende Schleifspuren zu bekommen, die die Jahrringe gut optisch vermessen lässt. Da die Scheiben sich beim Schleifen einseitig erwärmen, ist es sinnvoll größere Scheiben unmittelbar nach dem Schleifen zu messen, da sich die Scheibe später gelegentlich wölbt, was die Schärfe des Bildes bei der Vermessung negativ beeinflusst.

#### **2.2.4. Jahrringvermessung**

Die Jahrringe wurden mit der WoodScan Software, die eigens für diese Aufgaben am Institut für Waldwachstum entwickelt wurde, vermessen. Dabei fährt eine Digitalkamera über die eingespannte Scheibe, und nimmt schwarz-weiß Bilder auf. Diese Bilder werden danach vom Programm zusammengefügt, und analysiert. Durch den Grauwertunterschied der jeweiligen benachbarten Pixel und baumartspezifische Schwellenwerte kann die Software eigenständig Jahrringgrenzen erkennen und einfügen. Danach werden die eingefügten Jahrringgrenzen vom Vermessenden geprüft, und die Jahrringsequenz mit streng kontrollierten Referenzen verglichen. Falls ein Jahrring auf der Scheibe nicht erkennbar ist, weil zum Beispiel viele Jahrringe sehr eng beieinander sind, kann dies durch den Vergleich mit der Referenz erkannt werden, und der Fehler interaktiv behoben werden.

Es wurden insgesamt 8 Radian auf den Scheiben aus 1,3 m Schafthöhe vermessen, während aus den höher liegenden Scheiben 4 Radian vermessen wurden. Die Radian sind nach den Himmelsrichtungen orientiert, damit für bestimmte Untersuchung (z.B. Druckholzanalyse) die Position der Messung auf der Scheibe bekannt ist. Da für diese Studie die Information über die Lage des Radialzuwachses nicht von Bedeutung ist, wurden die Radialzuwächse in einem Jahr für jede Scheibe quadratisch gemittelt. Durch

diese Mittelung werden Autokorrelationen in dem Datensatz verringert, da ansonsten 4 bzw. 8 Einträge miteinander korreliert wären.

### **2.2.5. Höhenanalyse bei Fichte**

Zuerst wurde die Kronenschirmfläche der ausgewählten Bäume durch Kronenablotungen vermessen. Nach der Fällung wurde an den Fichten dann eine Höhenanalyse durchgeführt, bei der die jährlichen Höhentriebe anhand der Knospenbasisschuppennarben vermessen wurden. Gleichzeitig wurden Stammscheiben in mehreren Stammhöhen entnommen. Die Zählung der Jahrringe diente der Überprüfung der Höhenanalyse vor Ort, um die Qualität derselben noch im Bestand während der Messungen zu erhöhen.

Da die Datierung der Höhenzuwächse fehlerhaft sein kann, und die Genauigkeit mit der Entfernung zur Baumspitze abnimmt, wurden die Vermessungsergebnisse der Jahrringe aus dem Labor, bei denen sie mit geprüften Referenzen verglichen wurden, zur Verifizierung der Höhen in den einzelnen Stammabschnitten herangezogen. In den seltenen Fällen, in denen sich daraus eine Änderung der Anzahl der Jahrringe in einem Stammabschnitt ergab, wurden die Feldaufnahmen und deren Notizen herangezogen, um die Höhenanalyse zu modifizieren. Zusätzlich wurde in diesen Fällen die Gleichläufigkeit der Höhenanalyse des entsprechenden Einzelbaumes mit den anderen Bäumen im Kollektiv in Bezug auf Minima und Maxima als weitere Information zur Analyse benutzt.

### **2.2.6. Höhenanalyse bei Buche**

Von den Buchen wurden nur Stammscheiben entnommen, und vor Ort keine Höhenanalyse durchgeführt, da die Knospenbasisschuppennarben nicht so gut sichtbar sind, wie bei Fichte, und auch die Äste nicht quirlweise verteilt sind. Daher lässt sich eine vergleichbare Höhentriebsvermessung bei Buche nur für die letzten 10-20 Jahre

anfertigen, jedoch ist diese für das gesamte Baumalter nicht ohne hohe Ungenauigkeit möglich.

Die Höhenanalyse bei der Buche unterscheidet sich grundlegend von der Höhenanalyse bei der Fichte, da es bei der Fichte noch möglich ist mit einer nicht destruktiven Methode anhand der Knospenbasisschuppennarben das Höhenwachstum in jedem Jahr zu messen. Bei der Buche hingegen können mit dieser Methode nur die letzten Jahrestriebe zuverlässig gemessen werden. Hinzu kommt noch, dass die Fichte nur einen Haupttrieb entwickelt, während in einer Buchenkrone mehrere Haupttriebe vorhanden sein können. Eine weitere Methode wäre das komplette Zersägen des Stammes in Scheiben, was aus finanziellen Gründen nicht möglich war, da die Stämme danach weiter verkauft werden mussten.

Es war deshalb notwendig die Höhenentwicklung durch eine Interpolation zwischen den Zählungen an den Scheiben in verschiedenen Schafthöhen zu modellieren. Die Interpolation wurde mit der Methode von Newberry (1991) durchgeführt. Diese Methode entspricht der Methode von Carmean (1972) im unteren Stammbereich. Nur zwischen der letzten Scheibe und Wipfel unterscheidet sich die modifizierte Methode von Newberry, dessen geänderte Formel das Höhenwachstum in dem letzten Stammabschnitt nicht mehr systematisch überschätzt.

Die angewandte Methode interpoliert linear zwischen den einzelnen Scheiben, was zu langen Perioden führen kann, in denen der vorhergesagte Höhenzuwachs sich nicht verändert, falls die Scheibenentfernung groß ist. Es wird unterstellt, dass das jährliche Höhenwachstum zwischen den zwei Stammscheiben konstant ist. Die vorliegende Arbeit untersucht außerdem welche Schätzfehler mit der Anwendung dieser Methode verbunden sind.

### 3. Material

#### ***3.1 Auswahl der Untersuchungsregionen, der Standorte und der Baumarten***

Die Wuchsbezirksgruppe Nördliche Ostalb (WbGr6/01) wurde auf Grund folgender Eigenschaften als Untersuchungsregion ausgesucht<sup>1</sup>:

- Relativ große regionalklimatische Homogenität.
- Geringe Reliefunterschiede.
- Verzahntes Vorkommen verschiedenartiger Standortseinheiten.
- Existenz früherer waldwachstumskundlicher Auswertungen der Standortskartierung.
- Relativ große Anzahl ehemaliger und laufender waldwachstumskundlicher Versuchsflächen, sowie
- Verbreitetes Vorkommen der Baumarten Fichte und Buche.

Als zweite Region wurde der Einzelwuchsbezirk Flächenschwarzwald (EWB3/06) ausgewählt, da dieser ähnliche Eigenschaften mit sich bringt, und dadurch weitere Vergleichsmöglichkeiten ermöglicht.

Die untersuchten Baumarten sind Buche und Fichte, da diese beiden Baumarten forstwirtschaftlich die höchste Bedeutung in Baden-Württemberg haben. Da die Buche im Flächenschwarzwald aber nur eine untergeordnete Rolle spielt, wurde dort nur das Wachstum der Fichte analysiert. Im Flächenschwarzwald wurden die Fichten auf der Standortseinheit lehmiger Sand (IS) entnommen, auf der Ostalb die Buchen auf Kalkverwitterungslehm (KVL) und Fichten jeweils auf den Standortseinheiten Kalkverwitterungslehm (KVL) und Feuerstein-Schlufflehm (FSchl).

---

<sup>1</sup> Siehe Untheim 1996b

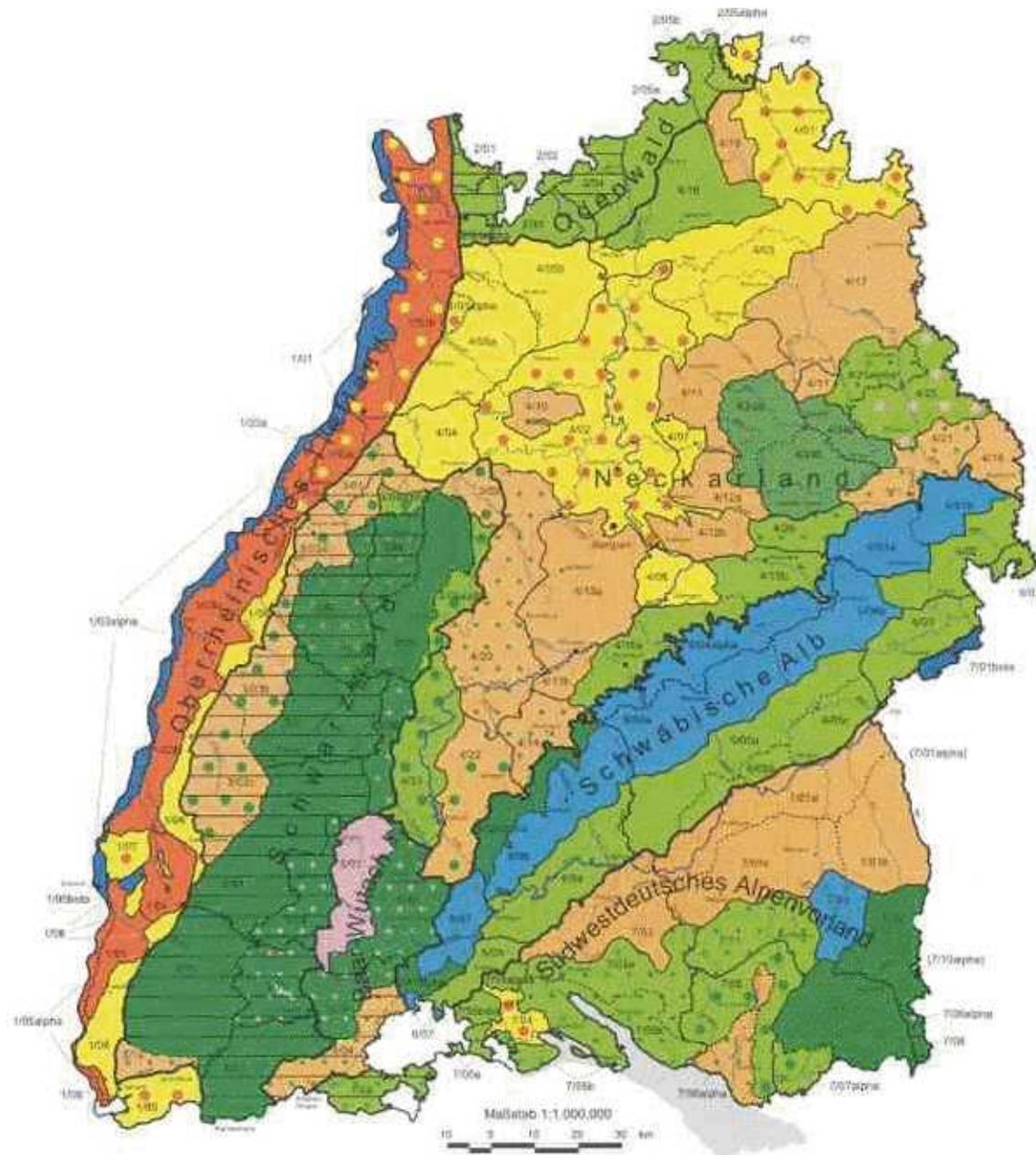


Abbildung 2: Übersichtskarte der Wuchsgebiete in Baden- Württemberg (Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg 2008)

Alle Standortseinheiten befinden sich im ebenen bzw. flach geneigten Gelände um Einflüsse von Exposition und Hangneigung zu minimieren bzw. auszuschließen. Die zwei Standorte auf der Nördlichen Ostalb unterscheiden sich im Nährstoffhaushalt deutlich voneinander. Es gibt in der Nördlichen Ostalb Standortseinheiten mit noch schlechteren Nährstoffhaushalten, jedoch wurden diese auf Grund von Düngungen nicht

in die Untersuchung mit aufgenommen (Untheim 1996b). Für die Analyse von Fichten auf zwei Standortseinheiten auf der Nördlichen Ostalb spricht<sup>2</sup>:

- vergleichbare regionalspezifische Klima- und Witterungseinflüsse,
- vergleichbare forstgeschichtliche Einflüsse,
- vergleichbare Immissionsgeschichte,
- überwiegend substratbedingte Standortunterschiede,
- keine systematischen Unterschiede bei der Bestandesbehandlung,
- keine systematischen Unterschiede bei der Genetik der aufstockenden Bestände (bei ihrer Begründung),
- spezifische Unterschiede zwischen den Standortseinheiten.

Durch die Auswahl von Fichte in zwei Regionen, und Buche auf einem Standort in einer Region ergeben sich 3 mögliche Vergleichsmöglichkeiten:

- Vergleich des Wachstums einer Baumart, in einer Region auf zwei verschiedenen Standortseinheiten (Fichte, Nördliche Ostalb, KVL und FSchl).
- Vergleich des Wachstums von zwei Baumarten, in einer Region auf derselben Standortseinheit (Fichte und Buche, Nördliche Ostalb, KVL).
- Vergleich Wachstums einer Baumart, in zwei Regionen auf verschiedenen Standortseinheiten (Fichte, Nördliche Ostalb, Flächenschwarzwald, KVL, FSchl und IS).

### 3.1.1. Flächenschwarzwald (Allgemeines)

Der Flächenschwarzwald befindet sich im nördlichen Schwarzwald, dem walddreichsten Wuchsgebiet Baden-Württembergs. Heutige Baumartenanteile im Wuchsgebiet Schwarzwald sind 45 % Fichte, 19 % Tanne, 6 % Kiefer, 4 % Douglasie, 14 % Buche, 2

---

<sup>2</sup> Siehe Untheim 1996b für Aufzählung und weitere Informationen

% andere Nadelbäume und 9 % andere Laubbäume (Gauer und Aldinger 2005). Die natürliche Waldgesellschaft im Flächenschwarzwald ist Hainsimsen-Buchenwald mit Tanne auf den nicht devastierten Flächen. Auf den devastierten Flächen ist die natürliche Waldgesellschaft Preiselbeer-Fichten-Tannenwald (Untheim 1996b). Die zwei in diese Studie involvierten Landkreise sind Freudenstadt, welcher den Hauptteil des Untersuchungsgebiets verwaltet, und der Landkreis Calw. Die Regionalwaldgesellschaft ist ein montaner Buchen-Tannen-Wald. Der Fichtenanteil ist sehr hoch in diesem Wuchsbezirk, was sich durch die forstliche Nutzungen (Weidbrennen, Wander-Glashütten) zurück bis ins Mittelalter begründet. An vielen Standorten wurden diese devastierten Flächen mit Fichten aufgeforstet (Gauer und Aldinger 2005). Genauere Informationen zum Wuchsbezirk Flächenschwarzwald sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Eigenschaft der Untersuchungsregion Flächenschwarzwald (Untheim 1996b)

	Flächenschwarzwald (3/06) ohne TB $\alpha$
Beschränkung des Untersuchungsgebietes innerhalb der regionalen Einheit	Südlicher Teil
Regionalwaldgesellschaft	Montaner Buchen-Tannen-Wald
Geomorphologie	Schwach nach Osten und Norden absinkende Flachlandschaft
Meereshöhe [m ü. N.N.]	300 – 875 / 640
Ausgangssubstrate für Bodenbildung	Oberer Bundsandstein, teilweise mit sandigem Schlufflehm überdeckt
Forstgeschichtliche Besonderheiten	Rodungen für Waldhufendörfer, Devastationen
Waldfläche in öffentlicher Hand	ca. 8.900 ha
Mittl. Niederschlagshöhe Jahr [mm]	870 - 1400
Mittl. Niederschlagshöhe Mai – Sept. [mm]	400 - 570
Mittl. Lufttemperatur Jahr [°C]	7,0 – 8,3
Mittl. Lufttemperatur Mai - Sept [°C]	14,5 – 16,0
Mittl. Jahresschwankung der Lufttemperatur [°C]	17,0 – 18,0

Tage mit mehr als 10°C Lufttemperatur 145 - 160

Quellen: (Bleich et al. 1986), (Mühlhäußer et al. 1985), (Müller et al. 1967), (Schlenker und Müller 1978), (Hübner und Mühlhäußer 1987)

### 3.1.1.1. Standortseinheit Buchen-Tannenwald auf mäßig frischem lehmigem Sand (IS)

In den flachen Lagen des Flächenschwarzwaldes wurde die Buntsandsteindecke nicht durch Erosion wie in den südlichen und westlichen Lagen des Schwarzwaldes abgetragen (Gauer und Aldinger 2005). Die Standortseinheit Buchen-Tannenwald auf mäßig frischem lehmigen Sand ist charakterisiert durch mindestens 60 cm wechselnd steinigen lehmigen Sand bis sandigen Lehm über meist durchlässigen tonigen Sand bis sandigen Ton (Unthelm 1996b). Etwa 30 % (~ 2.700 ha) der Fläche des Flächenschwarzwaldes sind unter dieser Standortseinheit klassifiziert (Hink 1973). Eine detaillierte Übersicht zur Standortseinheit Buchen-Tannenwald auf mäßig frischem lehmigem Sand sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Definition und Eigenschaften der untersuchten Standortseinheit lehmiger Sand (IS) ((Unthelm 1996b)

Standortseinheit	Buchen-Tannen-Wald auf mäßig frischem lehmigen Sand (IS)
Substrat	Mindestens 60 cm wechselnder steiniger, lehmiger Sand bis sandiger Lehm über meist durchlässigem tonigem Sand bis sandigen Ton aus Verwitterung des Oberen Buntsandsteins; Fließerdenbildung.
Morphologie	Flachlagen
Wasserhaushalt	Mäßig frisch
Nutzbare Wasserspeicherkapazität [mm]	90 – 150
Nährstoffversorgung	Mäßig bis schlecht
Humusform	F-Mull bis Moder
Bodentyp	Braunerde bis podsolige Braunerde

Ökolog. Artengruppen	Deschampsia flexuosa-, Vaccinium myrtillus-, Miliun effusum-, Ajuga reptans-, Blechnum spicant-, Luzula albida-, Luzula sylvatica, Carex sylvatica-Gruppe
Geschätzte Gesamtflächen [ha]	ca. 2.700

### 3.1.2. Nördliche Ostalb (Allgemeines)

Die Nördliche Ostalb befindet sich im Nord-Osten der Schwäbischen Alb. Das Klima auf der Nördlichen Ostalb ist kontinentaler einzustufen als im Flächenschwarzwald. Am Albtrauf sind hauptsächlich noch die Buchenwälder erhalten geblieben, während seit dem 19. Jahrhundert verstärkt Fichten auf den Hochflächen angepflanzt werden (Gauer und Aldinger 2005). Der Laubholzanteil und der Nadelholzanteil betragen beide etwa 50 %. Die Fichten wachsen gut auf den mittelgründigen Böden, mit einem leicht erhöhten Rotfäulerisiko. Auf aufgeforsteten ehemaligen landwirtschaftlichen Flächen ist das Rotfäulerisiko jedoch stark erhöht. Die Folgen des Extremjahres 2003 mit einem heißen und trockenen Sommer haben in den letzten Jahren zu erhöhten unplanmäßigen Einschlägen von Fichten aufgrund von Borkenkäferkalamitäten geführt. Die natürliche Waldvegetation auf der Nördlichen Ostalb sind Waldgersten-Buchen-Wald und Hainsimsen-Buchen-Wald auf den sauren Standorten (Gauer und Aldinger 2005). Die zwei in dieser Studie involvierten Landkreise sind der Ostalbkreis und der Landkreis Heidenheim. Weiter Informationen über die Wuchsbezirkgruppe Nördliche Ostalb sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Eigenschaft der Untersuchungsregion Nördliche Ostalb (Untheim 1996b)

	<b>Nördliche Ostalb (WBGr 6/01)</b>
Beschränkung des Untersuchungsgebietes innerhalb der regionalen Einheit	Keine
Regionalwaldgesellschaft	Kontinental-montaner Buchenwald
Geomorphologie	Schwach nach Südosten absinkende Flachlandschaft
Meereshöhe [m ü. N.N.]	460 - 778 / 650
Ausgangssubstrate für Bodenbildung	Weißjura Delta bis Epsilon, großflächig durch Feuersteinrestschuttdecken überlagert
Forstgeschichtliche Besonderheiten	Waldweide und Streunutzung, Eisenverhüttung
Waldfläche in öffentlicher Hand	ca. 18.000 ha
Mittl. Niederschlagshöhe Jahr [mm]	750 – 1070
Mittl. Niederschlagshöhe Mai – Sept. [mm]	440 – 520
Mittl. Lufttemperatur Jahr [°C]	6,5 – 7,2
Mittl. Lufttemperatur Mai - Sept [°C]	13,2 – 14,2
Mittl. Jahresschwankung der Lufttemperatur [°C]	18,5 – 19,0
Tage mit mehr als 10°C Lufttemperatur	140 - 150

Quellen: (Bleich et al. 1986), (Mühlhäußer et al. 1985), (Müller et al. 1967), (Schlenker und Müller 1973), (Villinger 1979)

### **3.1.2.1. Standortseinheit Elymus-Buchenwald auf mäßig frischem Kalkverwitterungslehm (KVL)**

Die Standortseinheit Elymus-Buchenwald auf mäßig frischem Kalkverwitterungslehm (KVL) bedeckt ca. 1.800 ha des Wuchsbezirksgruppe Nördliche Ostalb (Untheim 1996b), was etwa 10 % der Gesamtfläche entspricht (Villinger 1979). Sie ist charakterisiert durch ein mittelgründiges Substrat mit einer Schlufflehmauflage bis 40 cm. Teilweise ist nicht verwitterter Feuerstein in kleinen Mengen beigemischt, was keinen Einfluss auf die den

Säurehaushalt hat. Eine detaillierte Übersicht zur Standortseinheit Elymus-Buchenwald auf mäßig frischem lehmigem Kalkverwitterungslehm sind in Tabelle 5 aufgeführt:

Tabelle 5: Definition und Eigenschaften der untersuchten Standortseinheit Kalkverwitterungslehm (KVL) (Untheim 1996b)

Standortseinheit	Elymus-Buchenwald auf mäßig frischem Kalkverwitterungslehm (KVL)
Substrat	20 – 45 cm lehmig-toniger Lösungsrückstand der Weißjura-Kalksteinverwitterung über angewittertem klüftigen Gestein. Kalkspiegel i.d.R. unterhalb 20cm
Morphologie	Flachlagen
Wasserhaushalt	Mäßig frisch (Kalkdrainage, Durchwurzelung von Gesteinsklüften)
Nutzbare Wasserspeicherkapazität [mm]	45
Nährstoffversorgung	Gut
Humusform	Mull
Bodentyp	Terra fusca
Ökolog. Artengruppen	Elymus europaeus-, (Luzula albida-, Urtica dioica-) Gruppe
Geschätzte Gesamtflächen [ha]	1.800

### 3.1.2.2. Standortseinheit Hainsimsen-Buchen-Wald auf Feuerstein-Schlufflehm (FSchl)

Die Standortseinheit Hainsimsen-Buchen-Wald auf Feuerstein-Schlufflehm (FSchl) bedeckt ca. 3.600 ha des Wuchsbezirksgruppe Nördliche Ostalb (Untheim 1996b), was etwa 20 % der Gesamtfläche entspricht Villinger (1979). Sie ist charakterisiert durch ein meist tiefgründiges Substrat mit einer Schlufflehmauflage bis 60 cm. Sie hat die geringste Versauerung des Oberbodens innerhalb der Ökoserie der nicht vernässenden Feuerstein-Schlufflehme und Feuersteinlehme (siehe Moosmayer 1957). Eine detaillierte Übersicht

zur Standortseinheit Hainsimsen-Buchenwald auf Feuerstein-Schlufflehm ist in Tabelle 6 aufgeführt:

Tabelle 6: Definition und Eigenschaften der untersuchten Standortseinheit Feuerstein-Schlufflehm (FSchl) (Untheim 1996b)

Standortseinheit	Hainsimsen-Buchenwald auf Feuerstein-Schlufflehm
Substrat	40 – 60 cm schluffiger Lehm mit wechselndem Feuersteinanteil, meist über tertiärem Ockerlehm
Morphologie	Flachlagen
Wasserhaushalt	Mäßig frisch
Nutzbare Wasserspeicherkapazität [mm]	90 – 150
Nährstoffversorgung	Mäßig bis schlecht
Humusform	F-Mull bis Moder
Bodentyp	Parabraunerde, Braunerde, häufig podsolig
Ökolog. Artengruppen	Luzula albida-, Miliun effusum-, stellenweise Vaccinium myrtillus- Gruppe
Geschätzte Gesamtflächen [ha]	ca. 3.600

## 4. Ergebnisse

### 4.1 Veränderungen des Radialzuwachses in 1,3m Höhe

Wenn man sich den mittleren Radialzuwachs der Fichten betrachtet, ist es auffällig, dass von 1992 bis 2002 sehr hohe Radialzuwächse erreicht wurden (siehe Abbildung 3), die so in der Vergangenheit der Untersuchungseinheiten noch nicht aufgetreten sind, obwohl entsprechend dem oft beobachteten Alterstrend in der Jugend ein höherer Zuwachs zu erwarten wäre (Assmann 1961). Die vertikalen Linien in den Graphiken zeigen die Zeitpunkte der beiden Bundeswaldinventuren (1987 & 2002). Ab 2003 ist ein starker Einbruch zu erkennen, der wahrscheinlich auf den heißen und trockenen Sommer des Jahres 2003 zurückgeführt werden kann. Die Fichten auf der Ostalb, als auch im Flächenschwarzwald, zeigen einen vergleichbaren Verlauf in allen Altersklassen während diesem Zeitraum. Die Buchen auf Kalkverwitterungslehm der Ostalb zeigen eine differenziertere Reaktion. In diesem Stratum zeigen nur die jungen Buchen eine ähnliche Reaktion wie die Fichten, während die mittel alten und alten Buchen ihr Dickenwachstum bereits ab 1988 reduzieren.

Ein statistisch signifikanter Alterstrend konnte nicht beobachtet werden. Daher erschien eine Trendbereinigung bei den Fichten nicht sinnvoll. Vielmehr hätte in den meisten Fällen eine Regression einen positiven Alterstrend bei allen Altersklassen zu Folge, was ohne weitere Einflüsse nicht erklärbar wäre. Mögliche Ursachen könnten die Überlagerung des Alterstrends durch waldbauliche Maßnahmen, als auch durch den langfristigen Trend der Steigerung der Standortsproduktivität sein. Eine Auswertung der  $h/d$  Werte hatte zum Ergebnis, dass die jüngeren Bäume tendenziell, aber nicht signifikant, niedrigere  $h/d$  Werte haben, als gleich alte Bäume zu einem früheren Zeitpunkt (siehe Abbildung 4). Da sich deren Mittelwerte nicht statistisch unterscheiden, aber jüngere Bäume ein erhöhtes Höhenwachstum auf Grund von Standortsveränderungen vorweisen (Spiecker 1999, Untheim 1996b), kann gefolgert werden, dass der Radialzuwachs der jüngeren Altersklasse über dem Radialzuwachs der

älteren Altersklasse bei gleichem Alter liegen muss, was auch aus den Rohdaten ersichtlich wird. Die h/d-Werte Analyse zeigte, dass der Hauptunterschied zwischen dem Wachstum der jungen und der älteren Altersklassen ein starker h/d Werteabfall in den jungen Jahren ist.

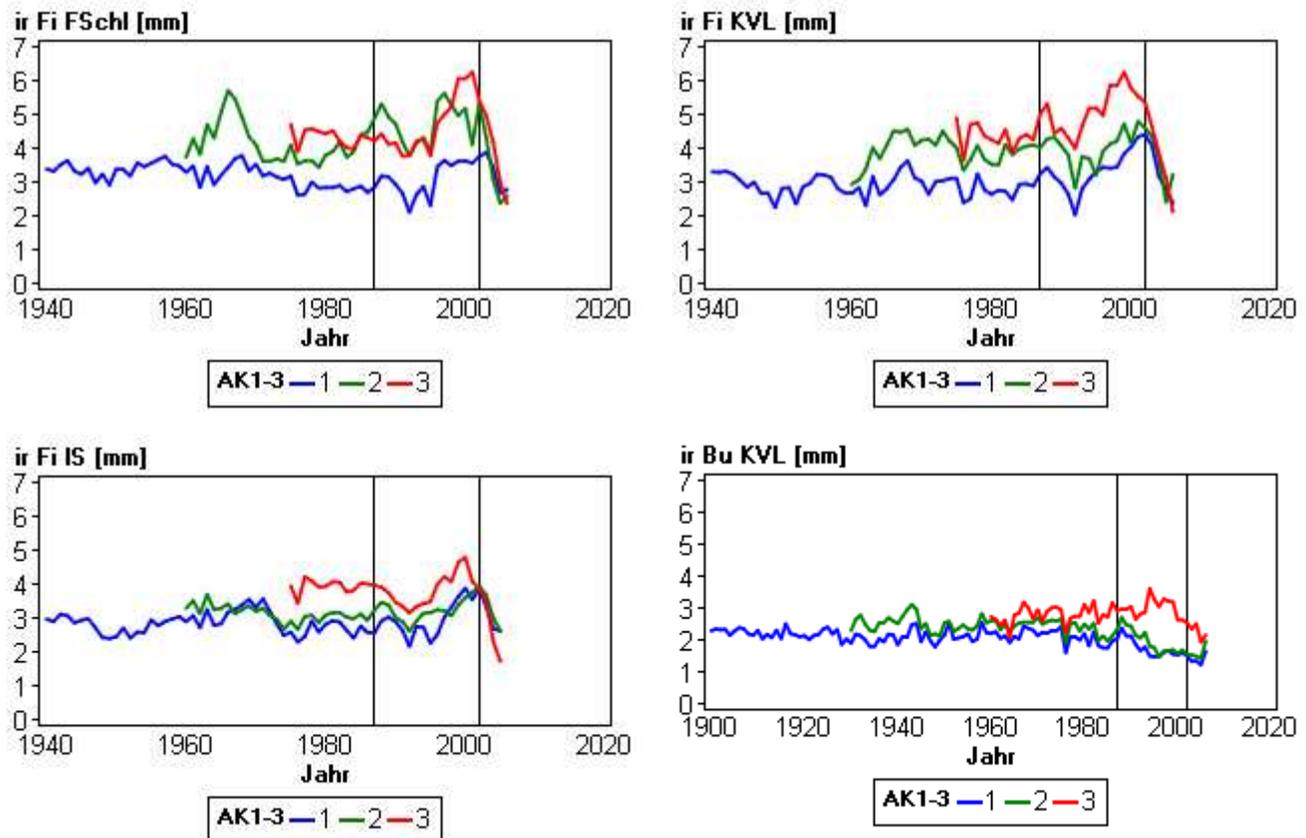


Abbildung 3: Mittlere jährliche Radialzuwächse in mm für je drei Altersklassen pro Untersuchungseinheit. Mittlere Alter der Fichten (Zeitpunkt: Jahr 2006) in Altersklasse 1 ist ca. 90 Jahre, in Altersklasse 2 ca. 60 Jahre und in Altersklasse 3 ca. 40 Jahre. Mittlere Alter der Buchen (Zeitpunkt: Jahr 2006) in Altersklasse 1 ist ca. 130 Jahre, in Altersklasse 2 ca. 90 Jahre und in Altersklasse 3 ca. 60 Jahre.

Da kein statistisch signifikanter Alterstrend des Radialzuwachses in den Daten der Fichten vorhanden war, wurde der Radialzuwachs jeder Untersuchungseinheit mit dem Mittelwert der selbigen standardisiert. Dies bedeutet, dass in einem Jahr, in dem der jährliche mittlere Radialzuwachs einer Untersuchungseinheit genau dem mittleren Dickenwachstum derselben Untersuchungseinheit über alle Jahre entspricht, ein standardisierter Radialzuwachs von 1,0 erreicht wurde.

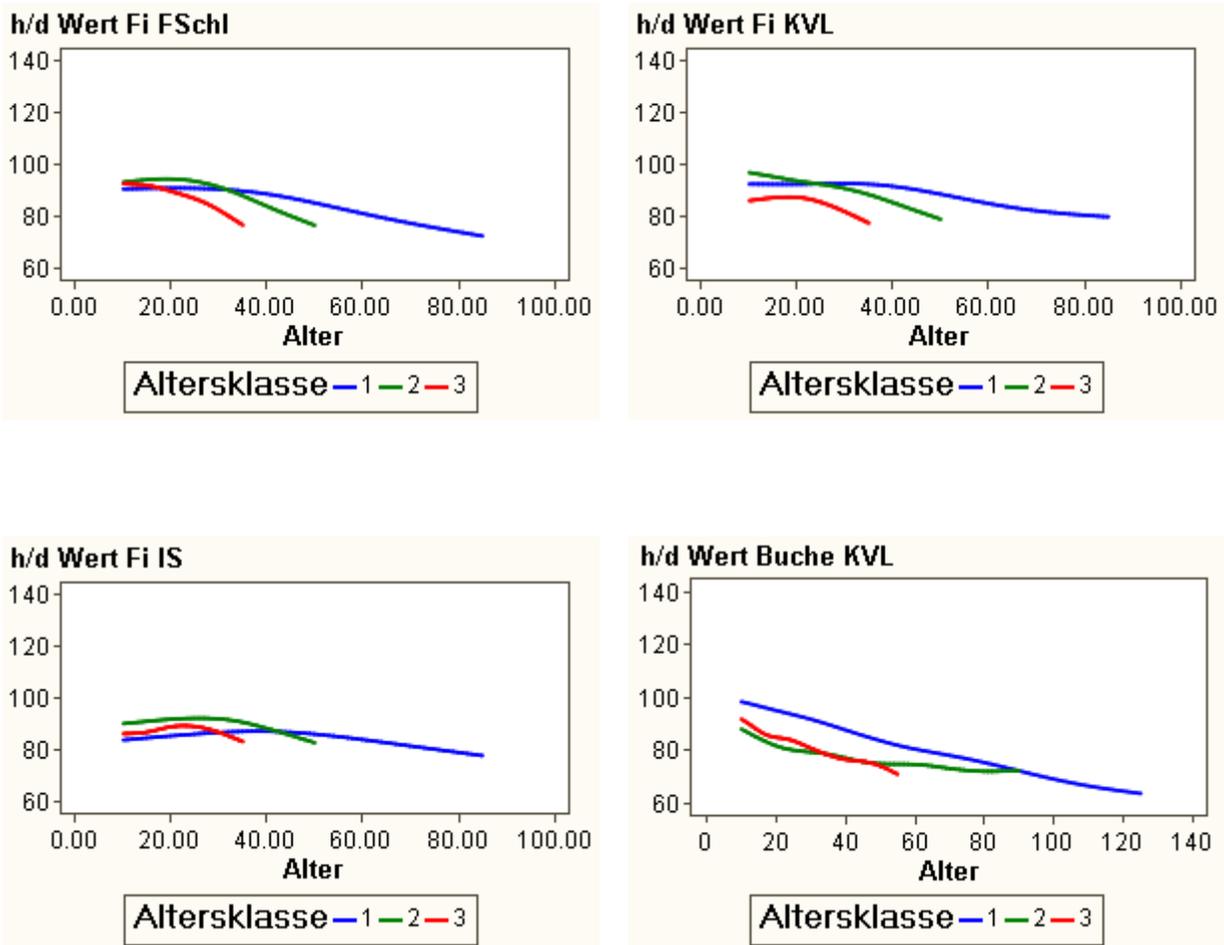


Abbildung 4: Darstellungen der mittleren h/d Wert Entwicklung der verschiedenen Straten

Auch bei den Buchen auf KVL war kein Alterstrend ersichtlich. Lediglich der Radialzuwachs der mittelalten und alten Buchen fiel ab Mitte der 80 Jahre leicht ab. Da jedoch dieser Abfall bei den mittleren als auch den alten Buchen etwa im selben Kalenderjahr erfolgte, spricht dies eher für einen anderen Faktor als das Alter. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurde der Radialzuwachs im Weiteren auf dieselbe Weise standardisiert wie bei den Fichten.

Bei Betrachtung der Ergebnisse (siehe Abbildung 5) über dem Kalenderjahr wird ersichtlich, dass die Gleichläufigkeit, die auch schon bei den Rohdaten zum Vorschein kam, beibehalten wurde. Der erhöhte Radialzuwachs am Ende der neunziger Jahre ist als überdurchschnittliches Zuwachs bei allen Fichten und den jungen Buchen ersichtlich, es

kommt aber auch ein unterdurchschnittlicher Zeitraum Ende der Achtziger bis Anfang der neunziger Jahre zum Vorschein.

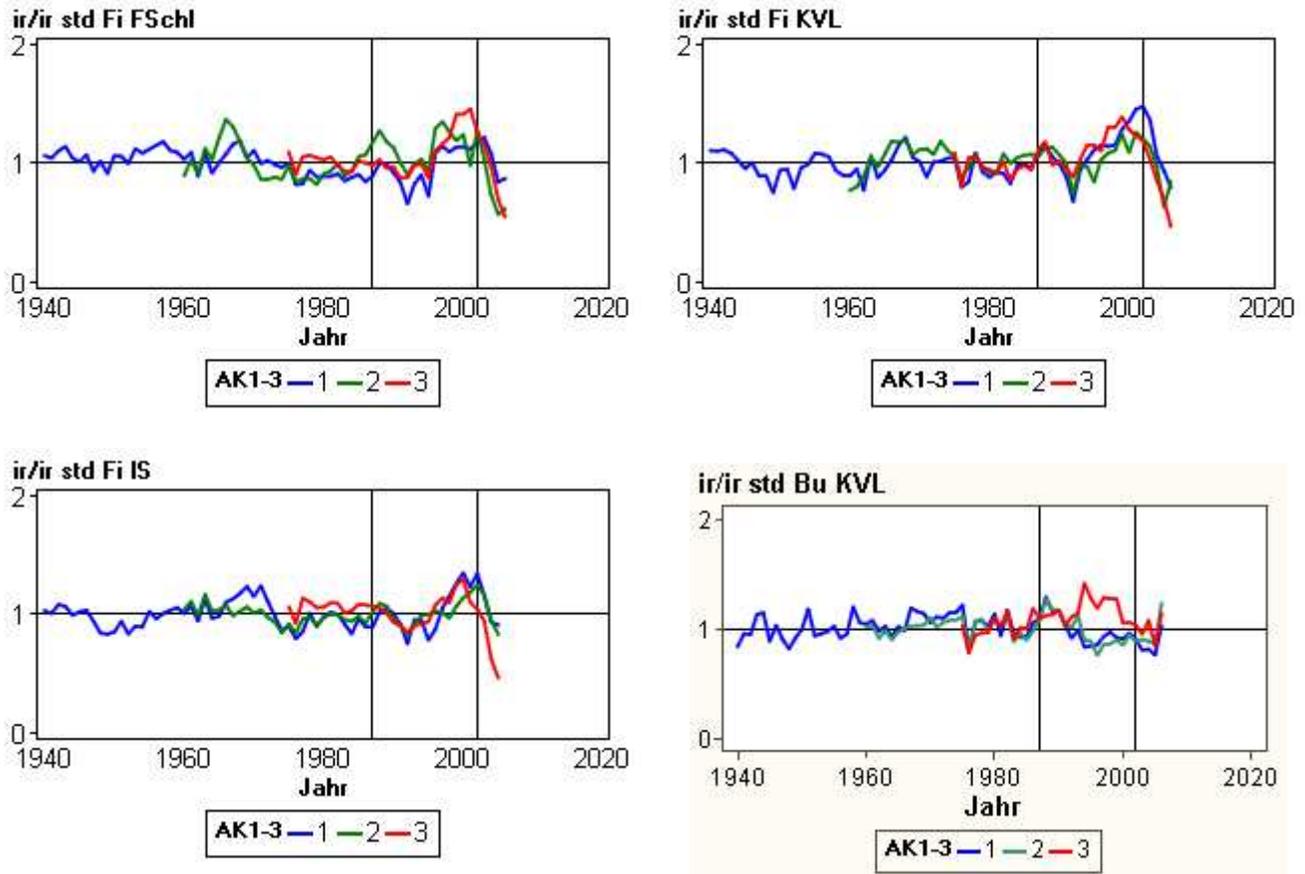


Abbildung 5:  $ir/ir$  standardisiert (quadr. Mittel) mit je drei Altersklassen pro Untersuchungseinheit. Das mittlere Alter (Zeitpunkt: Jahr 2006) in Altersklasse 1 ist ca. 90 Jahre, in Altersklasse 2 ca. 60 Jahre und in Altersklasse 3 ca. 40 Jahre.

Tabelle 7: Mittlerer standardisierter Radialzuwachs einer Untersuchungseinheit in verschiedenen gleichlangen Zeiträumen von 1939 bis 2002 und in den Jahren 2003 bis 2006; \* = unterscheidet sich signifikant von 1.0 bei  $\alpha = 0.05$

Mittelwert von ir/ir avg		Zeitraum				
Bodentyp	AK1-3	1939-1954	1955-1970	1971-1986	1987-2002	2003-2006
Fichte FSchl	1 (Alt)	1.05*	1.08*	0.91*	0.93*	1.02
	2 (Mittel)		1.04	0.92*	1.11*	0.75*
	3 (Jung)			1.00	1.05*	0.86*
Mittel aller Altersklassen Fichte FSchl		(1.05)*	(1.05)*	0.94*	1.00	0.91*
Fi KVL	1 (Alt)	0.99	1.00	0.95*	1.06*	1.08*
	2 (Mittel)		0.97	1.03	1.05*	0.91
	3 (Jung)			0.97*	1.10*	0.80*
Mittel aller Altersklassen Fichte KVL		(0.99)	(0.99)	0.97*	1.07*	0.96
Fi IS	1 (Alt)	0.96*	1.06*	0.95*	0.98	1.00
	2 (Mittel)		1.03	0.95*	1.01	0.98
	3 (Jung)			1.07*	1.00	0.68*
Mittel aller Altersklassen Fichte IS		(0.96)*	(1.04)*	0.97*	0.99	0.93
Mittel aller Altersklassen Fichte		(1.00)	(1.03)*	0.96*	1.02*	0.93*
Bu KVL	1 (Alt)	1,01	1,04*	0,98	0,83*	0,66*
	2 (Mittel)		1,07*	1,00	0,83*	0,68*
	3 (Jung)			1,04*	1,09*	0,82*
Mittel aller Altersklassen Buche KVL		(1,01)	(1,05)*	1,00	0,91	0,72*

Um das Radialwachstum in den Jahren 1987 bis 2002 mit gleichlangen Zeiträumen in der Vergangenheit vergleichen zu können, wurden die Mittelwerte der standardisierten Dickenzuwächse für jede Untersuchungseinheit und verschiedene Zeiträume gebildet (siehe Tabelle 7). Bei der Betrachtung der Tabelle ist zu beachten, dass im Zeitraum von 2003 bis 2006 weniger Jahre, und somit weniger Messungen enthalten sind, die diesen Zeitraum weniger aussagekräftig machen. Es wird sichtbar, dass auf den Standorten der nördlichen Ostalb die mittelalten und jungen Fichten ein signifikant überdurchschnittliches Dickenwachstum im Zeitraum von 1987 bis 2002 aufweisen, während nur die alten Fichten auf Kalkverwitterungslehm auch in diesem Zeitraum ein überdurchschnittliches Dickenwachstum haben. Die älteren Fichten weisen im Zeitraum von 1955 bis 1970 einen besonders hohen Zuwachs auf (vgl. Spiecker 1986 und 1987). Das Dickenwachstum ist bei den jungen und mittelalten Fichten im Zeitraum von 1987 und 2002 bis zu 11 % über dem Durchschnitt. Der Radialzuwachs kann auch in Zeitintervallen von 15 Jahren bemerkenswerte Unterschiede von mehr als 15% aufweisen! Als besonders wüchsig zeichnen sich die Wachstumsperioden 1955 - 1970 sowie 1987 – 2002 aus. Deutlich weniger wüchsig erweisen sich die Perioden 1972 – 1986 sowie der Zeitraum von 2003 bis 2006, der jedoch durch seinen kürzeren Zeitraum weniger repräsentativ ist.

Im Gegensatz zu den Fichten ist der Radialzuwachs der mittelalten und alten Buchen im Zeitraum von 1987 bis 2002 deutlich und signifikant unter Durchschnittswerten. Nur die jungen Buchen zeigen einen signifikant erhöhten Radialzuwachs.

In Tabelle 8 sind die standardisierten Radialzuwächse in der Periode von 1971 bis 1986 auf 100 % gesetzt, um das Wachstum in der Periode zwischen den Bundeswaldinventuren mit dem Wachstum in der vorherigen Periode vergleichen zu können. In alle Straten der Fichte, außer den jungen Fichten auf lehmigen Sand, zeigt sich ein deutlich höherer Radialzuwachs in der Periode zwischen den zwei Bundeswaldinventuren, als in der vorherigen 15 jährigen Periode. Sie liegen zwischen zwei Prozent und 21 % höher als in der vorherigen Periode von 1971-1986. Wenn man bedenkt, dass der Radialzuwachs nicht linear in das Volumen eingeht, bedeutet dies ein

noch höherer Volumenzuwachs in dem Zeitraum zwischen den zwei Bundeswaldinventuren im Vergleich zur vorherigen Periode.

Tabelle 8: Mittlere standardisierte Radialzuwächse einer Untersuchungseinheit in verschiedenen gleichlangen Zeiträumen von 1939 bis 2002 und im Zeitraum von 2003 bis 2006 verglichen mit dem mittleren Radialzuwachs von 1971 bis 1986; \* = unterscheidet sich signifikant von 1.0 bei  $\alpha = 0.05$

Mittelwert von $ir/ir$ avg <sub>1971-1986</sub>		Zeitraum				
Bodentyp	AK1-3	1939-1954	1955-1970	1971-1986	1987-2002	2003-2006
Fichte FSchl	1 (Alt)	1,15*	1,18*	1,00	1,02	1,11*
	2 (Mittel)		1,13*	1,00	1,21*	0,82*
	3 (Jung)			1,00	1,06	0,87*
Mittel aller Altersklassen Fichte FSchl		(1,15)*	(1,16)*	1,00	1,10*	0,93
Fichte KVL	1 (Alt)	1,04	1,06*	1,00	1,12*	1,14*
	2 (Mittel)		0,94	1,00	1,02	0,88
	3 (Jung)			1,00	1,14*	0,83*
Mittel aller Altersklassen Fichte KVL		(1,04)	(1,00)	1,00	1,09*	0,95
Fichte IS	1 (Alt)	1,00	1,11*	1,00	1,09*	0,95
	2 (Mittel)		1,09*	1,00	1,07*	1,03
	3 (Jung)			1,00	0,93	0,63*
Mittel aller Altersklassen Fichte IS		(1,00)	(1,10)*	1,00	1,01	0,90
Mittel aller Altersklassen Fichte		(1,04)*	(1,07)*	1,00	1,06*	0,97
Buche KVL	1 (Alt)	1,03	1,06*	1,00	0,85	0,67*
	2 (Mittel)		1,07*	1,00	0,83*	0,68*
	3 (Jung)			1,00	1,05	0,79
Mittel aller Altersklassen Buche KVL		(1,00)	(1,10)*	1,00	1,01	0,90

## 4.2. Analyse des Höhenwachstums bei Fichte

Nach Prüfung des Datensatzes war es nicht notwendig Ausreißer aus dem vorhandenen Datenmaterial zu eliminieren. Die Weibull und auch die Chapman-Richards Wachstumsformeln (siehe Tabelle 1) waren für die Anpassung nicht geeignet, da sie Anpassungsprobleme am Anfang als auch am Ende der Daten aufwiesen. Da die jüngste Altersklasse aber nur 40 Jahre alt ist, sind Fehler in den ersten 10 Jahren und in den letzten 5 Jahren nicht akzeptabel.

Die Levakovic III Anpassung hingegen wies diese Probleme für das vorhandene Datenmaterial nicht auf. Die Parameterschätzungen für die Asymptote waren auch bei einer qualitativen Betrachtung sinnvoll. Zuletzt wurde die Levakovic III Anpassung mit mehreren Anpassungen von Splines verglichen. Es konnte keine Splineanpassung gefunden werden, die den Daten besser angepasst war, als die Levakovic III Anpassung, ohne kurzen Wachstumsdepressionen zu folgen. Da die Interpretierbarkeit von Splines, die einem positiven Alterstrend folgen würden, physiologisch auch kaum erklärbar ist, wurde die Exploration hier abgebrochen, und die Levakovic III Anpassung für die Trendbereinigung angewendet.

Aufgrund der vorher diskutierten Ergebnisse wurde die Höhenentwicklungen der Fichten mit einer Levakovic III Funktion nach Zeide (1993) modelliert und standardisiert, welche die beste Anpassung an die Daten hatten und deren Verlauf auch physiologisch erklärbar ist. Die Funktion schätzt 3 Parameter in folgender Form:

Differentialform:  $y = a(t^2/(b+t^2))^c$

Integralform:  $y' = 2bcy/t(b+t^2)$

y Höhe des Baumes

t Alter

y' Höhenzuwachs

a,b,c geschätzte Parameter

Die Residuen der einzelnen Anpassungen (siehe Abbildung 6) zeigen keine systematischen Trends bei einer okularen Betrachtung. Die insgesamt 27 geschätzten Parameter waren in 25 Fällen hoch signifikant bei einem Bestimmtheitsmaß von  $\alpha=0,001$ , und in 2 Fällen in der jüngsten Altersklasse signifikant bei einem Bestimmtheitsmaß von  $\alpha=0,01$ , was auf Grund der Anpassung auf einen kurzen Zeitraum zurückzuführen ist. Da es für die Studie wichtig ist, dass alle Höhenzuwächse mit derselben (vergleichbaren) Methode standardisiert werden, wurde die Funktion für alle Untersuchungseinheiten verwendet und jeden Baum einzeln angepasst. Das nicht lineare Bestimmtheitsmaß war in allen Fällen sehr hoch (siehe Tabelle 9: ) zwischen 0,87 und 0,98.

**Tabelle 9:** Nicht lineares Bestimmtheitsmaß der Höhenregression bei der Fichte nach Levakovic III

Standortstyp	Altersklasse	Nicht lineares Bestimmtheitsmaß
Fichte Feuerstein-Schlufflehm (FSchl)	1	0,97***
	2	0,98***
	3	0,97**
Fichte Kalkverwitterungslehm (KVL)	1	0,96***
	2	0,97***
	3	0,89***
Fichte Lehmgiger Sand (IS)	1	0,94***
	2	0,95***
	3	0,94**

\*\*\* alle 3 Parameter hoch signifikant,  $\alpha = 0,001$

\*\* 2 Parameter hoch signifikant,  $\alpha = 0,001$ , 1 Parameter signifikant  $\alpha = 0,01$

In Abbildung 7 wird ersichtlich, dass das Höhenwachstum im Zeitraum 1987 und 2002 starke Schwankungen aufweist, bis zu Minima, von weniger als 50 % des zu erwartenden Höhenwachstums. So extreme und zahlreiche Minima sind bei keiner Untersuchungseinheit zuvor in der Entwicklung der Einzelbäume eingetreten. Nur durch den Extremsommer im Jahre 2003 und dessen Folgewirkungen auf die darauffolgenden Jahre wurden noch stärker ausgeprägte Minima erreicht.

Es scheint als ob die Volatilität des Höhenzuwachses ab den achtziger Jahren zunimmt. Mehrere der Straten haben in diesem Zeitraum sowohl ihre absoluten Minima als auch ihre Maxima.

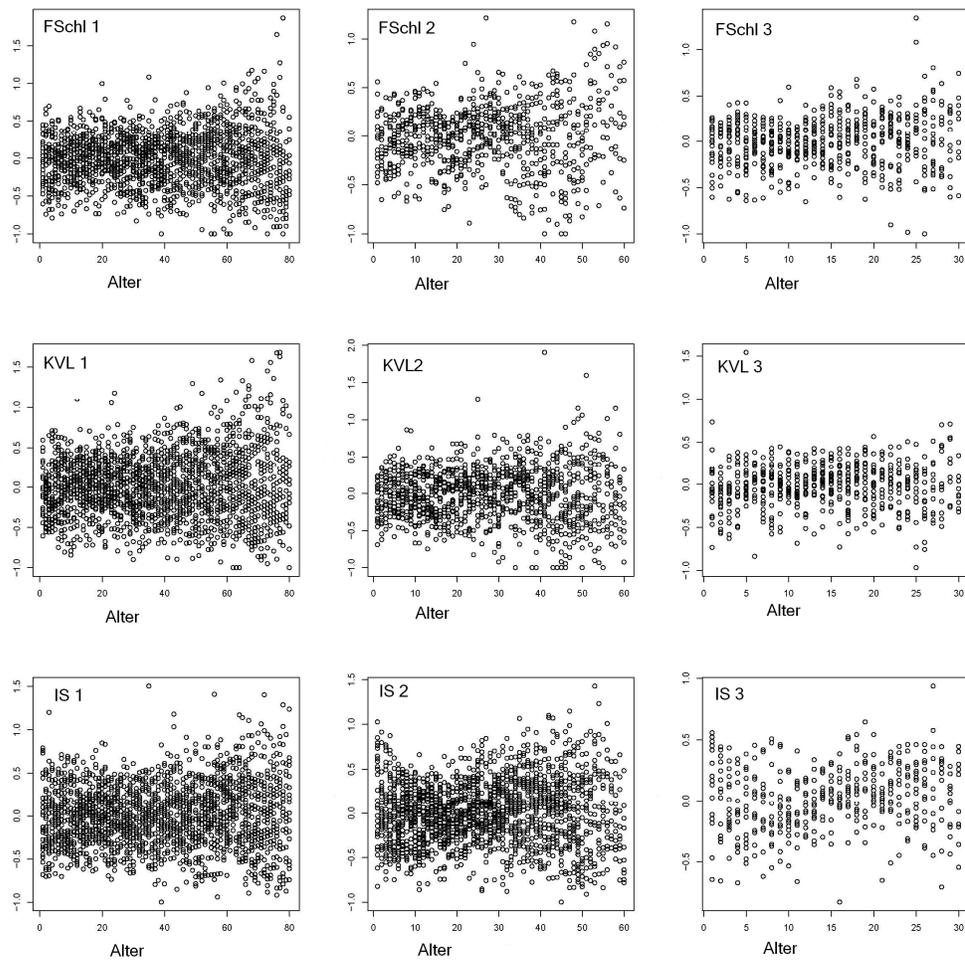


Abbildung 6: Residuenverteilung der Levakovic III Anpassung der Höhenkurven der Fichten für alle drei Standorte je Altersklasse

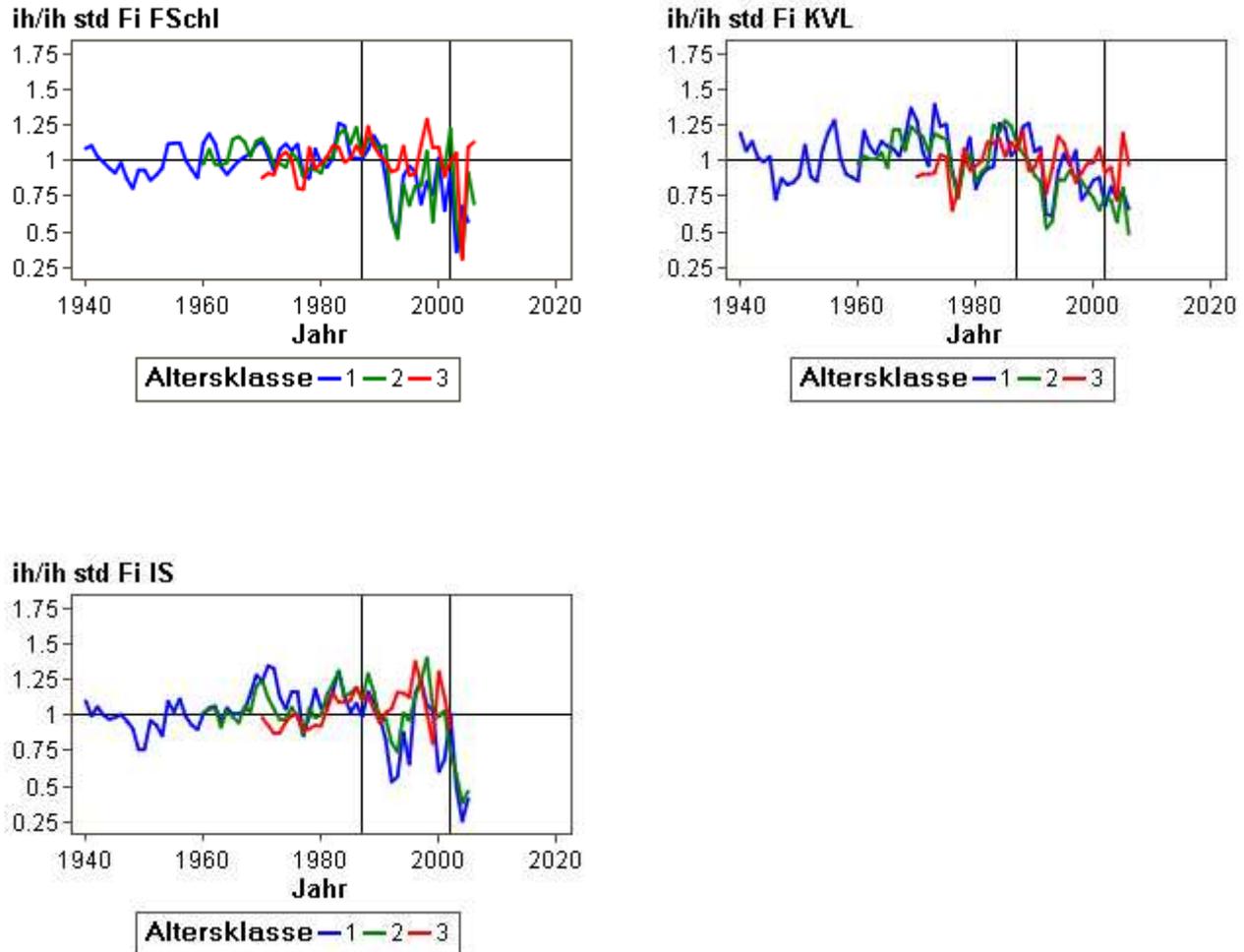


Abbildung 7: Quotient aus dem tatsächlichen jährlichen Höhenzuwachs und dem vorhergesagte Höhenwachstum (Levakovic III) der verschiedenen Untersuchungseinheiten der Fi zu verschiedenen Jahren. Das mittlere Alter der Fichten (Zeitpunkt: Jahr 2006) in Altersklasse 1 ist ca. 90 Jahre, in Altersklasse 2 ca. 60 Jahre und in Altersklasse 3 ca. 40 Jahre.

Der Quotient aus dem Höhenwachstums der Einzelbäume durch das vorhergesagte (modellerte) Höhenwachstum der Subpopulation wurde gebildet. Mit dieser Kenngröße ist nun möglich, das Höhenwachstum der Einzelbäumen in einem Kalenderjahr mit dem Höhenwachstum der Subpopulation zu vergleichen, da deren Höhenwachstum über das kambiale Alter in 1,3m Höhe definiert wird, und nicht über das Kalenderjahr (siehe Abbildung 7).

Wenn man den Quotienten aus dem tatsächlichen jährlichen Höhenwachstums und dem vorhergesagte Zuwachs (aus Regression) betrachtet, fällt auf, dass der Höhenzuwachs im Zeitraum zwischen 1987 und 2002 bei den jüngsten Altersklassen im Mittel überdurchschnittlich verlaufen ist (siehe Tabelle 10 und 11), jedoch nur signifikant überdurchschnittlich bei den jungen Fichten auf lehmigen Sand.. In der mittelalten Altersklasse weist nur die Fichte auf lehmigen Sand ein nicht signifikant überdurchschnittliches Höhenwachstum im Zeitraum zwischen den Jahren 1987 und 2002 auf. Alle anderen alten und mittelalten Altersklassen zeigen ein etwas unterdurchschnittliches Höhenwachstum während diesem Zeitraum. Auffällig ist der extreme Abfall des Höhenzuwachses im Zeitraum 2003 bis 2006. Nicht selten liegt hier der Höhenzuwachs unterhalb von 60 % des erwarteten Zuwachses.

**Tabelle 10:** Mittlerer Quotient aus dem tatsächlichen Höhenwachstum und dem vorhergesagte Höhenzuwachs (Levakovic III) der verschiedenen Untersuchungseinheiten der Fi in verschiedenen gleichlangen Zeiträumen von 1939 bis 2002 und im Zeitraum von 2003 – 2006; \* = unterscheidet sich signifikant von 1.0 bei  $\alpha = 0.05$

Mittelwert von $ih/ih_{predict}$		Zeitraum				
Standort	Altersklasse	1939-1954	1955-1970	1971-1986	1987-2002	2003-2006
FSchl	1 (alt)	0.97	1.04*	1.04*	0.91*	0.62*
	2 (mittel)		1.08	1.03*	0.94	0.62*
	3 (jung)			1.00	1.04	0.88
Mittel aller Altersklassen FSchl		0.97	1.04*	1.03*	0.97	0.72*
KVL	1 (alt)	0.98	1.11*	1.06*	0.98	0.76*
	2 (mittel)		1.06*	1.07*	0.86*	0.67*
	3 (jung)			0.99	1.00	0.96
Mittel aller Altersklassen KVL		0.98	1.07*	1.04*	0.95*	0.75*
IS	1 (alt)	0.97*	1.05*	1.13*	0.90*	0.38*
	2 (mittel)		1.05*	1.07*	1.03	0.48*
	3 (jung)			1.00	1.08*	0.76*
Mittel aller Altersklassen IS		0.97*	1.04*	1.08*	1.01	0.45*
Mittel aller Altersklassen		0.95*	1.05*	1.05*	0.98*	0.64*

In Tabelle 11 wurde zur besseren Vergleichbarkeit der Höhenzuwachs in der Periode vor der ersten Bundeswaldinventur auf 100 % gesetzt. Es wird ersichtlich, dass nur die jungen Fichten auf lehmigen Sand ein signifikant erhöhtes Höhenwachstum von acht Prozent in den Jahren 1987 bis 2002 aufweisen. Die mittelalten und alten Fichten zeigen dagegen im gleichen Zeitraum eine zum Teil signifikante vier bis 20 % Höhenzuwachsreduktion.

Tabelle 11: Mittlerer Quotient aus dem tatsächlichen Höhenwachstum und dem vorhergesagte Höhenzuwachs (Levakovic III) der verschiedenen Untersuchungseinheiten der Fi in verschiedenen gleichlangen Zeiträumen von 1939 bis 2002 und im Zeitraum von 2003 bis 2006; \* = unterscheidet sich signifikant von 1.0 bei  $\alpha=0.05$

Mittelwert von ih/ih predict <sub>1971-1986</sub>		Zeitraum				
Standort	Altersklasse	1939-1954	1955-1970	1971-1986	1987-2002	2003-2006
Fichte FSchl	1 (alt)	0.93*	1.00	1.00	0.88*	0.60*
	2 (mittel)		1.05	1.00	0.91	0.60*
	3 (jung)			1.00	1.04	0.88
Mittel aller Altersklassen Fichte FSchl		(0,93)*	(1,03)	1,00	0,94*	0,69*
Fichte KVL	1 (alt)	0.93*	1.05*	1.00	0.92*	0.72*
	2 (mittel)		0,99	1.00	0.91*	0.60*
	3 (jung)			1,00	1.01	0.97
Mittel aller Altersklassen Fichte KVL		(0,93)*	(1,02)	1,00	0,95*	0,76*
Fichte IS	1 (alt)	0.86*	0,93*	1.00	0.80*	0.34*
	2 (mittel)		0,98	1.00	0,96	0,45*
	3 (jung)			1.00	1.08*	0,83
Mittel aller Altersklassen Fichte IS		(0,86)*	(0,96)	1,00	0,95*	0,54*
Mittel aller Altersklassen Fichte		(0,91)*	(1,00)	1,00	0,95*	0,66*

Zuletzt wurde das Höhenwachstum der einzelnen Untersuchungseinheiten mit dem Wachstum der ältesten Altersklasse verglichen. Dazu wurde zunächst das Wachstum der

mittelalten und jungen Altersklassen mit dem Wachstum der alten Altersklasse bei demselben d1,3 Alter standardisiert. Die Verläufe der Quotienten der jungen und mittelalten Altersklassen sind in Abbildung 8 dargestellt. Es ist auffällig, dass die jungen Altersklassen bis auf wenige Ausnahmen in allen Jahren ein stärkeres Höhenwachstum als die alten Altersklassen haben, während die mittelalten Altersklassen gegen Ende des Betrachtungszeitraums unter 1,0 liegen, was einem geringeren Höhenwachstum als das der alten Altersklasse entspricht.

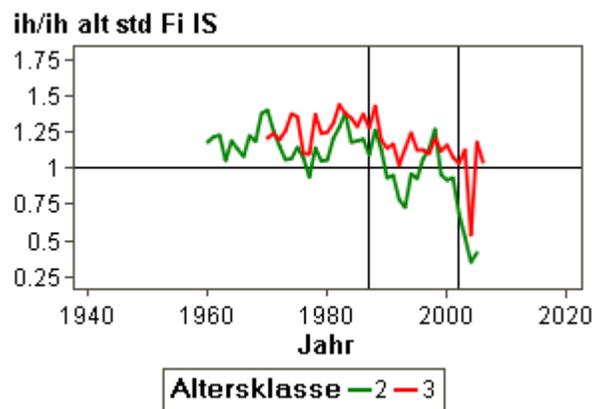
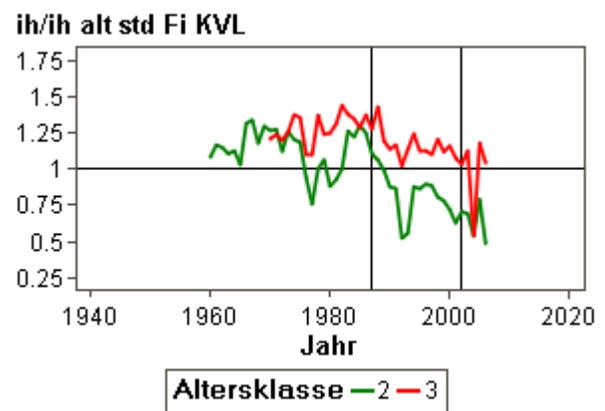
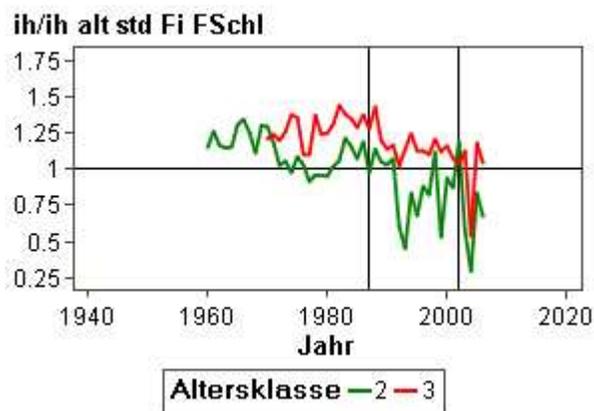


Abbildung 8: Quotient aus dem tatsächlichen jährlichen Höhenzuwachs durch den vorhergesagten Höhenzuwachs der ältesten Altersklasse bei gleichem Alter der verschiedenen Untersuchungseinheiten der Fi zu verschiedenen Jahren. Das mittlere Alter der Fichten (Zeitpunkt: Jahr 2006) in Altersklasse 1 ist ca. 90 Jahre, in Altersklasse 2 ca. 60 Jahre und in Altersklasse 3 ca. 40 Jahre.

Wenn man den Zeitraum von 1987 bis 2002 mit vorherigen Perioden vergleicht (siehe Tabelle 12) wird ersichtlich, dass besonders die mittelalten Fichten in diesem Zeitraum ein zum Teil signifikant vermindertes Höhenwachstum im Vergleich zu dem Höhenwachstums der alten Fichten beim selben Alter erfahren haben. Die jungen Fichten weisen immer ein erhöhtes standardisiertes Höhenwachstum als die älteren Fichten auf, obwohl sie im Zeitraum von 1987 bis 2002 auch ein geringeres Höhenwachstum als in der vorherigen Periode erbrachten.

Tabelle 12: Mittlerer Quotient aus dem tatsächlichen Höhenwachstum durch das vorhergesagte Höhenwachstum der ältesten Altersklasse bei gleichem Alter der verschiedenen Untersuchungseinheiten der Fi in verschiedenen gleichlangen Zeiträumen von 1939 bis 2002 und im Zeitraum von 2003 bis 2006; \* = unterscheidet sich signifikant von 1.0 bei  $\alpha = 0,05$

Mittelwert von $ih/ih_{predAlt}$		Zeitraum			
Baumart & Standort	Altersklasse	1955-1970	1971-1986	1987-2002	2003-2006
Fichte FSchl	2 (mittel)	1.21*	1.06*	0.91*	0.58*
	3 (jung)		1.25*	1.11*	0.85
Mittel aller Altersklassen Fichte FSchl		(1.21)*	1.17*	1.04	0.72*
Fichte KVL	2 (mittel)	1.14*	1.11*	0.87*	0.67*
	3 (jung)		1.29*	1.22*	1.15
Mittel aller Altersklassen Fichte KVL		(1.14)*	1.19*	1.05	0.80*
Fichte IS	2 (mittel)	1.19*	1.14*	0.99	0.43*
	3 (jung)		1.27*	1.24*	0,88
Mittel aller Altersklassen Fichte IS		(1.19)*	1.18*	1.06*	0.43*
Mittel aller Altersklassen Fichte		(1.17)*	1.18*	1.05*	0.65*

In Tabelle 13 wird nun das Höhenwachstum der jungen und mittelalten Fichten, welches mit dem Wachstum der alten Fichten standardisiert wurde, in dem Zeitraum von 1971 bis 1986 auf 100 % gesetzt. Der Vergleich macht deutlich, dass das standardisierte Höhenwachstum der jungen und mittelalten Fichten unter dem der alten Fichten liegt. Dies bedeutet nicht, dass die alten Bäume größere Höhenzuwächse als die jüngeren

Bäume hatten. Ganz im Gegenteil absolut gesehen war der Höhenzuwachs der alten Bäume geringer der jungen und mittelalten Bäumen. Jedoch war die Verringerung des Höhenzuwachses in diesem Zeitraum in Prozent gesehen deutlich und signifikant stärker bei den jungen und mittelalten Bäumen.

Tabelle 13: Mittlerer Quotient aus dem tatsächlichen jährlichen Höhenzuwachs durch den vorhergesagten Höhenzuwachs der ältesten Altersklasse bei gleichem Alter der verschiedenen Untersuchungseinheiten der Fi in verschiedenen gleichlangen Zeiträumen von 1939 bis 2002 und im Zeitraum von 2003-2006; Zeitraum 1971 - 1986 = 100 %; \* = unterscheidet sich signifikant von 1.0 bei  $\alpha = 0,05$

Mittelwert von $ih/ih_{predAlt_{1971-1986}}$		Zeitraum			
Baumart & Standort	Altersklasse	1955-1970	1971-1986	1987-2002	2003-2006
Fichte FSchl	2 (mittel)	1,14*	1,00	0,86*	0,55*
	3 (jung)		1,00	0,89*	0,68*
Mittel aller Altersklassen Fichte FSchl		(1,14)*	1,00	0,88*	0,62*
Fichte KVL	2 (mittel)	1,03	1,00	0,78*	0,60*
	3 (jung)		1,00	0,95	0,89
Mittel aller Altersklassen Fichte KVL		(1,03)	1,00	0,87*	0,75*
Fichte IS	2 (mittel)	1,04	1,00	0,87*	0,38*
	3 (jung)		1,00	0,98	0,69*
Mittel aller Altersklassen Fichte IS		(1,04)	1,00	0,93*	0,54*
Mittel aller Altersklassen Fichte		(1,07)	1,00	0,89*	0,64*

### **4.3 Analyse des Höhenwachstums bei Buche**

Auch bei der Buche wurden mehrere Anpassungen (Weibull, Chapman-Richards und Levakovic III) an das Höhenwachstum vorgenommen. Wie schon zuvor bei der Fichte, war die Anpassung mit der höchsten Korrelation mit Levakovic III erreicht. Auch hier waren alle Parameter hoch signifikant (bei  $\alpha=0.001$ ). Allerdings gab es keine Anpassung, welche nicht systematische Fehler in den Residuen aufzeigte. Nach extensiver Exploration dieses Problems, konnten die Gründe für dieses Problem bestimmt werden:

1. Es gibt eine stärkere Variation im Alter bei den Buchen in einer Altersklasse. Die Bestände wurden auf Grund von Einrichtungswerken ausgewählt. Jedoch ist die Altersbestimmung der Bäume in Einrichtungswerk nicht immer auf den tatsächlichen Pflanzterminen bzw. Verjüngungsjahren basierend, sondern oft auch Einschätzung des Einrichters. Schließlich ist das Alter von Buchen schwieriger zu schätzen als von Fichte. Aus den Daten wurde ersichtlich, dass dies zu einigen Fehlern in der Altersschätzung in den Einrichtungswerken geführt hat. Diese zusätzliche Variation verringert die Qualität und Analysierbarkeit der Daten.
2. Wie schon in den Methoden diskutiert, gibt es bei der Buche nur sehr wenige Messungen im Vergleich mit der Fichte. Dadurch reduziert sich die Anzahl an tatsächlich gemessenen Datenpunkten drastisch. Während bei einer 100 jährigen Fichte 100 Datenpunkte gemessen wurden, sind es im Schnitt bei einer 100 jährigen Buche nur sieben Scheiben und keine Höhenanalyse, die eine jährliche Höhenzuwachsmessung ermöglicht.
3. Die interpolierten Messwerte nach (Newberry 1991) bringen keiner weiten Information, sind aber miteinander korreliert, und deswegen für die Regression nicht geeignet.

Durch die Kombination der drei zuvor genannten Probleme ist es nicht möglich mit unechten Wuchsreihen von Buchen, wie sie hier in dieser Studie vorliegen, eine

Auswertung spezifisch auf einzelne Jahre (oder kurze Perioden) statistisch relevant in Bezug auf das Höhenwachstum durchzuführen. Deshalb beschränkt sich die Höhenanalyse der Buchenstraten auf die Bestätigung des linearen Trends der veränderten Standortsproduktivität.

Nach Exploration der Daten und Analysemöglichkeiten scheint eine jahrspezifische Höhenzuwachsanalyse nur mit destruktiven Mitteln bei der Buche möglich, welche aus Gründen der vorhandenen Mittel in dieser Studie nicht durchführbar waren.

#### ***4.4 Bestätigung des Trends der veränderten Standortsproduktivität***

Um abzuklären, ob das Wachstum sich im Zeitraum zwischen den Jahren 1987 und 2002 im Vergleich zu der Vergangenheit verändert hat, wurde zuerst verifiziert, ob der Trend zur Steigerung der Standortsproduktivität weiterhin angehalten hat (siehe Untheim 1996b, Spiecker 1999).

Dazu wurden in einem linearen Modell (siehe Untheim 1996b) die Höhe eines Baumes bei einem definierten Alter in verschiedenen Kalenderjahren regressionsanalytisch untersucht. Alle geschätzten Parameter (Interzept und Steigung) waren bei allen Regressionen signifikant bei  $\alpha = 0.001$  bzw.  $\alpha = 0.01$  (siehe Tabelle 14). Die Steigungen, also die Veränderung der Höhe über den Jahren entsprechen annähernd den Werten von Untheim (1996b) und liegen zwischen 2 m und 10 m. So ist beispielsweise Fichte heute zwischen 3,5 m und 5 m höher als vor 50 Jahren, bzw. 7 m bis 10 m höher als vor 100 Jahren.

Es konnten keine anderen Funktionstypen gefunden werden, die diesen Trend besser darstellen können. Die Schätzungen der Veränderungen (Steigung) werden auch unterstützt durch die Ergebnisse von Nothdurft (2007), welcher mit einem nichtlinearen, hierarchischen und gemischten Modell zu vergleichbaren Ergebnissen kommt.

Dadurch ist eine Grundannahme dieser Studie, nämlich die Annahme, dass sich die Standortsproduktivität langfristig und nachhaltig durch erhöhten Stickstoffeintrag und andere anthropogene Einflüsse verbessert (siehe Kahle et al. 2008), bestätigt worden.

Abbildung 9: Die Höhen der Bäume sind für drei konstante Alter über dem jeweiligen Kalenderjahr aufgetragen und durch lineare Regressionen ausgeglichen.

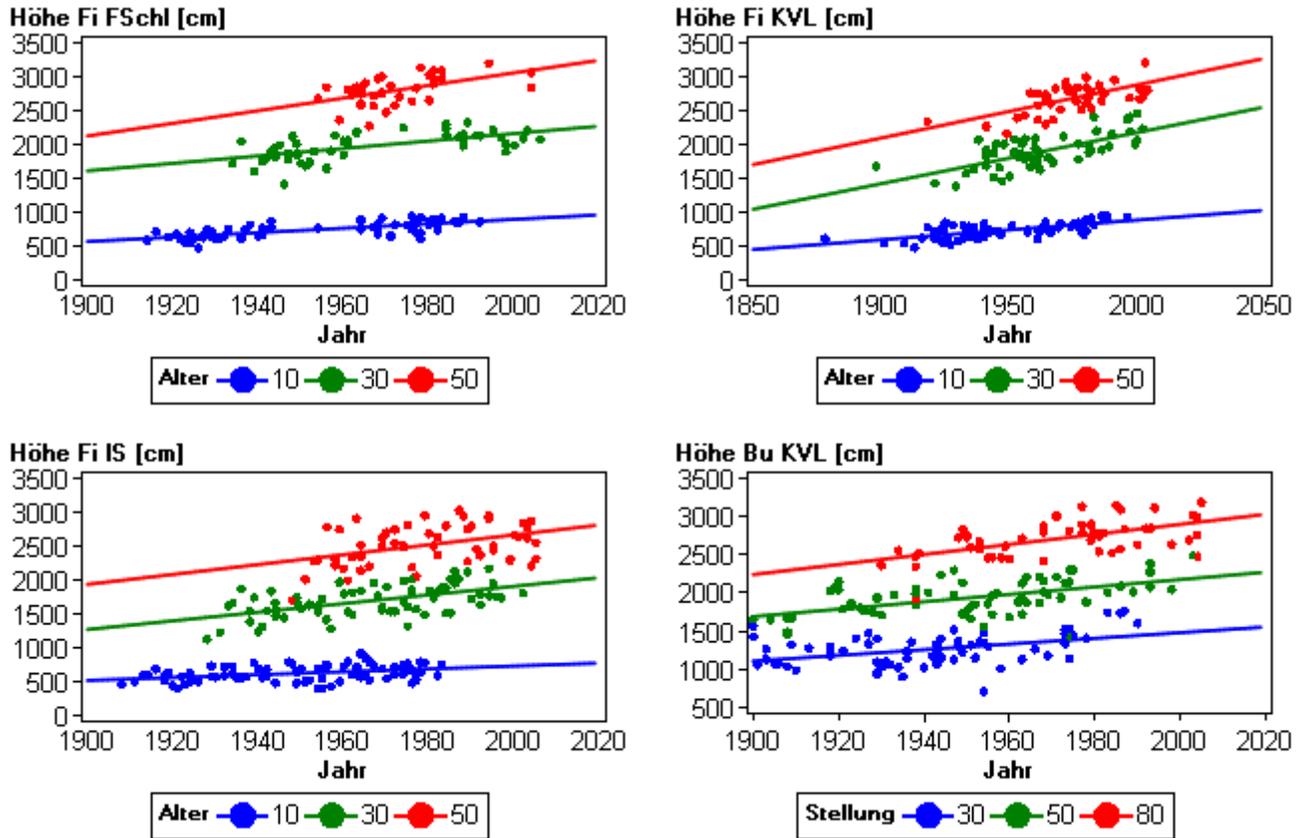


Tabelle 14: Höhe von Bäumen aus verschiedenen Untersuchungseinheiten bei definierten d1,3-Altern.

Baumart & Standort	Alter	Interzept	Steigung	R <sup>2</sup>
Fichte KVL	10	-4091***	2,45***	0,43
	30	-12329***	7,22***	0,47
	50	-11858***	7,34***	0,37
Fichte FSCHL	10	-5173***	3,00***	0,50
	30	-8417***	5,26***	0,39
	50	-16717**	9,88**	0,29
Fichte IS	10	-3167**	1,92**	0,13
	30	-10778***	6,32***	0,33
	50	-12466**	7,54**	0,20
Buche KVL	30	-5355**	3,41***	0,22
	50	-7465***	4,82***	0,29
	80	-10183***	6,54***	0,33

\*\*\* hoch signifikant,  $\alpha=0,001$

\*\* signifikant,  $\alpha=0,01$

## 5. Diskussion

### 5.1 Beurteilung des Materials

Die untersuchten Bäume wurden mit einem für das Stratum repräsentativen Stichprobendesign entnommen. Es wurde pro Bestand nur ein Baum entnommen um Korrelationen zwischen Bäumen zu vermeiden. Auf dieser Grundlage sollte der Radialzuwachs und der Höhenzuwachs und seine Veränderungen im Laufe der Zeit untersucht werden. Das Datenmaterial erwies sich für diese Untersuchung als geeignet, und sehr umfangreich. Für alle 300 Bäume wurden Jahrringanalysen und Höhenanalysen angefertigt und verifiziert. Daher ist die Datengrundlage dieser Arbeit mit mehr als 400.000 einzelne Jahrringsmessungen, welche im Wald gezählt, und im Labor vermessen und verifiziert wurden, und zusätzlichen 13,000 einzelnen Höhenmessungen, die im Wald als auch im Labor vermessen und mit Jahrringszählungen verglichen wurden, als optimal anzusehen. Allerdings ergaben sich auch Grenzen der Analysierbarkeit bzw. Interpretierbarkeit:

1. Es wurden nur Einzelbäume aufgenommen und Höhen und Radialzuwachs analysiert. Das Wachstum von vorherrschenden Bäumen muss nicht repräsentativ für das Wachstum von Beständen sein (Spiecker 1992), insbesondere wenn während der Entwicklung des Bestandes eine Änderung der Bewirtschaftung eingetreten ist. Die h/d Entwicklung eines jeden Baumes wurde mit der h/d Entwicklung des kompletten Kollektivs verglichen, um sicher zu sein, dass keine Ausreißer das Ergebnis verfälschen. Da schon während der Auswahl darauf geachtet wurde, dass sich die Bäume im herrschenden bzw. vorherrschenden Kollektiv befanden, und nicht dort hineingewachsen sind, war es nicht notwendig Ausreißer zu eliminieren.

2. Aufgrund der veränderten Bewirtschaftung oder der Veränderung des Standortes, zeigen die jungen Altersklassen einen schnelleren h/d-Wert Abfall in den jungen Jahren als die mittelalten und alten Altersklassen, die eher eine vergleichbare h/d-Wertentwicklung vorweisen. Da die Bäume repräsentativ für ein Stratum in einem Wuchsgebiet sein sollten, und hierfür Versuchsflächendaten nicht verfügbar waren, muss diese Tendenz in den h/d Werten akzeptiert werden. Es wurde gezeigt, dass die jungen Bäume eindeutig einen höheren Radialzuwachs aufweisen, als die mittelalten oder alten Bäume in früheren Jahren. Während ein Teil dieses erhöhten Wachstums wahrscheinlich auf die erhöhte Standortsproduktivität zurückzuführen ist, hat auch die Bewirtschaftung insbesondere die Durchforstungsintensität Einfluss auf das Dickenwachstum. Da jedoch bei allen jungen Bäumen ab 1992 ein stark erhöhtes Dickenwachstum festzustellen ist, insbesondere im Vergleich zu den mittelalten und alten Bäumen, liegt der Schluss nahe, dass der Hauptfaktor kurzfristige kalenderjahrspezifische Einflüsse sind, und nicht die Bewirtschaftung, da es unwahrscheinlich ist, dass in allen Straten zur selben Zeit die Bäume freigestellt wurden.
3. Mit den vorhandenen Daten war es nur möglich den Trend der Veränderung der Standortsproduktivität bei den Buchen zu verifizieren. Da bei Buche keine detaillierte Höhenanalyse aus technischen Gründen gemacht werden konnte, waren die Daten nicht ausreichend, um eine Höhenanalyse auf Jahresniveau statistisch signifikant und insbesondere ohne systematische Fehler zu berechnen. Für diese Auswertung sind Versuchsflächendaten oder destruktive Messmethoden, bei denen der ganze Baum in kleine Stücke zersägt werden muss, notwendig, die beide für diese Arbeit nicht zur Verfügung standen.

## 5.2 Beurteilung der Methoden

Die in dieser Arbeit verwendeten und entwickelten Methoden ermöglichten es die Daten in Bezug auf die Teilhypothese zu analysieren und vergleichende, quantitative Aussagen über das Wachstum der Bäume in dem Zeitraum zwischen den zwei Bundeswaldinventuren zu machen.

Trotzdem ergeben sich aus der Kombination von Datenmaterial und Methoden gewisse Limitierungen:

1. Bei der Auswertung des Radialzuwachses war es nur möglich mit dem Mittelwert zu standardisieren. Objektiv gesehen gab es keine andere Standardisierungsmöglichkeit, die auch physiologisch erklärbar gewesen wäre, da auch kein Alterstrend verifizierbar war. Es stellt sich aber auch hier die Frage, in wie weit das Dichtemanagement auf Grund von Durchforstungen hier eine Rolle spielt. Eine andere Möglichkeit wäre, dass ein stark beschleunigter Radialzuwachs den negativ gerichteten Alterstrend komplett überlagert hat. Um Aussagen zu diesen zwei Punkten zu machen, sind aber Versuchsflächendaten notwendig, die im Rahmen dieser Arbeit nicht verfügbar waren. Da ein Anspruch dieser Arbeit die Repräsentativität der Ergebnisse für eine Kombination aus Wuchsgebiet, Baumart und Standort ist, konnte nicht auf Versuchsflächendaten zurückgegriffen werden, da keine geeigneten Flächen zur Verfügung stehen.
2. Bei der Bestätigung des anhaltenden linearen Trends zur Verbesserung der Standortsproduktivität, konnte gezeigt werden, dass dieser signifikante Trend noch besteht. Jedoch waren die  $R^2$ -Werte unter 0,5, was eine nicht sehr hohe Korrelation ist. Bei einer Exploration nicht lineare Trends, ergaben sich jedoch keine besseren Anpassungen. Dies ist zum ersten darauf zurückzuführen, dass es auch innerhalb eines Standortsart Bonitätsunterschiede gibt. Da unechte Wuchsreihen verwendet wurden, bei denen die Stichprobenbäume aus verschiedenen Beständen stammen ergibt sich eine größere Variation. Man könnte

dies mit echten Wuchsreihen aus Versuchsflächendaten reduzieren, jedoch wären diese wiederum nicht repräsentativ für die verschiedenen Straten, was wie vorher diskutiert ein Anspruch dieser Arbeit ist. Eine weitere Möglichkeit, die zurzeit diskutiert wird ist, dass dieser lineare Trend sich in jüngster Zeit umkehrt (siehe Yue & Kohnle 2009). Jedoch sind hier noch wenige Ergebnisse publiziert. Da Trends einen Zeitraum von wenigstens 30 Jahren umfassen (siehe Spiecker 1996) sollten, um als langfristig angesehen werden zu können, wird es wahrscheinlich noch einige Jahre bzw. Jahrzehnte nicht möglich sein, die neue Trends zur langfristigen Änderung der Standortsproduktivität verifizieren zu können.

### **5.3 Diskussion der Ergebnisse**

Die vorliegende Arbeit hat die folgenden Teilhypothesen bestätigt:

1. Der lineare Trend der Steigerung der Standortsproduktivität wurde in der Arbeit bestätigt. Für beide Baumarten und Straten wurde ein signifikanter linearer Trend mit einer Änderung von 2 bis 10m in 100 Jahren festgestellt.
2. Es wurde gezeigt, dass in mehreren Straten bei Buche und Fichte, insbesondere in jüngeren Altersklassen, der Radialzuwachs als Zeiger für kurzfristige Variationen, welche auf Witterung zurückzuführen sind (Spiecker 1986) in den Jahren 1987 bis 2002 signifikant überdurchschnittlich hoch war und deshalb über den zu erwartenden Werten lag.
3. Es wurde gezeigt, dass das Höhenwachstum der Fichten nicht systematisch über den zu erwarten Werten lag. Da das Höhenwachstum als Zeiger für langfristige Änderungen der Standortsproduktivität hier herangezogen wurde, zeigt es, dass bis jetzt keine langfristigen Änderungen des langfristigen Trends eingetreten sind.

Die Analyse der Veränderung der Standortsproduktivität zeigt bei allen Straten, dass sich die Standortsproduktivität, wahrscheinlich auf Grund von Stickstoffeinträgen (siehe Kahle et al. 2008) erhöht hat. Es ist aber auch auffallend, dass die Korrelationskoeffizienten unter den Werten von Untheim (1996) liegen. Yue und Kohnle (2009) diskutierten in ihrem Beitrag, ob sich diese lineare Trend bereits verändert hat. Dies konnte in dieser Arbeit noch nicht festgestellt werden. Allerdings wiesen die letzten Jahre von 2003 bis 2006 extrem geringe Radial- und Höhenzuwächse auf. Es könnte daher sein, dass wir uns gerade am Wendepunkt befinden. Dies kann jedoch nur in der Zukunft retrospektiv analysiert werden.

Es wurde in vielen Straten ein erhöhter Radialzuwachs festgestellt. In dieser Studie wurde der Radialzuwachs als Weiser von kurz- und mittelfristigen Phänomenen herangezogen. Becker (1989) jedoch benutzt auch den Radialzuwachs als Zeiger für

langfristige Standortveränderungen. Natürlich ist der Radialzuwachs auch von der Standortsproduktivität beeinflusst, er wird jedoch auch stark von Konkurrenzverhältnissen geprägt. Falls sich die Bestandesdichte nicht geändert hat ist es möglich den Radialzuwachs als Weiser für Standortveränderungen zu verwenden, jedoch dürfte es sehr schwierig sein Unterschiede in den Konkurrenzverhältnissen auszuschließen. Bei der Auswertung der h/d Werte war es offensichtlich, dass sich die h/d Werte der jungen Bäume leicht anders als die der Alten im selben Alter verhalten. Genau dieser stärkere Abfall der h/d Werte könnte sowohl auf Standortverbesserungen als auch geringere Konkurrenz basieren. Hier ist es wichtig sowohl Versuchsflächendaten als auch neue Zwischeninventuren (siehe Rheinland Pfalz Zwischeninventur) mit in die Analysen einzubeziehen.

Letztlich hat sich gezeigt, dass die Höhenzuwächse bei Fichten nicht systematisch überdurchschnittlich verliefen. In einigen Fällen lagen die Höhenzuwächse sogar unter den zu erwartenden Werten. Hier stellt sich die Frage in wie weit Witterungsverhältnisse auch Auswirkungen auf das Höhenwachstum haben.

#### ***5.4. Auswirkungen auf die Forstliche Planung***

Die hier vorgelegte Studie konnte zeigen, dass das Dickenwachstum überdurchschnittlich im Zeitraum zwischen den zwei Bundeswaldinventuren auf den ausgesuchten Standorten für die beiden ausgesuchten Baumarten verlief. Wenn man bedenkt, dass der Radialzuwachs in direktem Zusammenhang mit dem Volumenzuwachs steht, bedeutet dieser Befund, dass der Volumenzuwachs im Inventurzeitraum überdurchschnittlich hoch lag.

Die vorhandenen Fallstudien, die nicht repräsentativ für die Bestände des Landes Baden-Württemberg sind, aber doch auf ausgesuchten Standorten repräsentativ zeigen, dass zumindest ein großer Teil des erhöhten Wachstum im Zeitraum zwischen den zwei Bundeswaldinventuren eher als kurzfristig einzuschätzen ist und damit die aus der BWI2 abgeleiteten Zuwächse das längerfristige Wachstum überschätzen. Bedingt durch den sehr geringen Zuwachs in der Zeit von 2003 bis 2006 ist im kommenden

Inventurzeitraum ein Zuwachsrückgang zu erwarten. Zumindest in den hier untersuchten Fällen scheint es als ob diese Überschätzungen sich in bestimmten Fällen im zweistelligen Prozentbereich befinden können. Dadurch ergibt sich die Notwendigkeit für folgende Punkte:

1. Das Zeitintervall zwischen den beiden Bundeswaldinventuren mit bisher 15 Jahren scheint nur bedingt für eine Vorhersage des Wachstums unserer Wälder geeignet. Eine Wiederholung der BWI scheint daher angebracht.
2. Es gibt zurzeit eine Tendenz Ertragstafeln, auf Grund von gerechtfertigter Kritik durch neuere Tafeln zu ersetzen, die auch auf die BWI Daten einbeziehen. Ein Kritikpunkt ist, dass die Ertragstafeln auf unechten Zeitreihen basieren, und dass es eventuell zum Zeitraum der Ertragstafelnentwicklung wenig gutwüchsige alte Bestände gab, da diese früher geerntet werden. Dies hätte zur Folge, dass die Ertragstafeln einen Einbruch zum Beispiel des Dickenwachstums im Alter vorhersagen, was zum Beispiel in dieser Studie nicht bestätigt werden konnte. Generell sollte bei der Entwicklung von neuen Ertragstafeln jedoch berücksichtigt werden, dass der letzte Inventurzeitraum kurz bzw. mittelfristig überdurchschnittliche Zuwachsleistungen aufwies. Daher sollten auch andere Datenquellen wie zum Beispiel Daten von Versuchsflächen mit in die Entwicklung neuer Ertragstafeln einfließen. Ansonsten wäre die Folge, dass der Zuwachs überschätzt wird und die Wälder übernutzt werden. Wir haben in Baden-Württemberg eher zu viel alte Bestände, so dass dies kurz oder mittelfristig keine negativen Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit der Bewirtschaftung haben sollte, aber es könnte bedeuten, dass Bestände zu suboptimalen Zeitpunkten geerntet werden würden, was mit Zuwachs- und Wertverlusten einhergehen könnte.

## 6. Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wird der Höhenzuwachs und der Radialzuwachs im Zeitraum zwischen den zwei Bundeswaldinventuren in den Jahren 1987 und 2002 mit früheren Wachstumsperioden und auch der nachfolgenden Periode in eine Fallstudie untersucht. Die Studie befasst sich mit dem Wachstum der Fichte im Flächenschwarzwald und auf der Nördlichen Ostalb, und Buche auf der Nördlichen Ostalb. Mit einer Kombination von Blockstichprobe und systematischer Stichprobe wurden vorherrschende Bäume in verschiedenen Beständen ausgesucht, und vermessen. Es wurden je drei Altersklassen von Fichten auf lehmigen Sand, Feuerstein-Schlufflehm und Kalkverwitterungslehm aufgenommen, und drei Altersklassen von Buchen auf Kalkverwitterungslehm.

Die Bestände sind dieselben, die Unthelm (1996b) für seine Arbeit ausgewählt hatte, was es erlaubt beide Datensätze zusammen zu analysieren. Das Höhenwachstum wird in dieser Arbeit als Zeiger für den Standort bzw. langfristige Standortveränderungen herangezogen, während der Radialzuwachs als Zeiger für kurz- und mittelfristige Wachstumsphänomene, die oft witterungsbedingt sind, benutzt wird. Der Höhenzuwachs der Fichten wurde mit einem nicht-linearen Modell nach Levakovic III standardisiert. Da der Radialzuwachs in den letzten zwei Jahrzehnten überdurchschnittlich bei allen Straten verlief, war kein negativer Alterstrend vorhanden. Aus diesem Grund wurde der Radialzuwachs mit dem Mittelwert standardisiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Radialzuwachs im Inventurzeitraum bei 6 der 9 Fichtenstraten zwischen eins und elf Prozent über den zu erwartenden Werten liegen, wenn man sich die gesamte Lebenszeit der Bäume betrachtet. Nur bei 3 von 9 Fichtenstraten, insbesondere bei der ältesten Altersklasse sind die Radialzuwächse unter den zu erwartenden Werten. Wenn man das Wachstum in der Periode zwischen den zwei Bundeswaldinventuren mit einer gleichlangen Periode direkt zuvor vergleicht, ist der Radialzuwachs bei acht von neun Fichtenstraten zwischen 2 und 22 % über dem Zuwachs von der vorherigen Periode. Bei der Buche ist nur die jüngste Altersklasse neun Prozent

über den zu erwartenden Werten, bzw. 5 % über dem Wachstum in der vorherigen Periode.

Zusätzlich wurden Wachstumskurven nach der Levakovic III Formel an das Höhenwachstum angepasst, um auch das Höhenwachstum zu standardisieren, und zu vergleichen. Beim Höhenwachstum jedoch zeigen sich keine eindeutigen Trends in diesem Zeitraum. Schließlich wurde der langfristige Trend der Standortsverbesserung verifiziert. Bei allen Straten ergaben sich signifikante Steigerungen im Höhenwachstum im Laufe der Zeit. Dies bestätigt damit weiterhin die Ergebnisse von Untheim (1996b) und Nothdurft (2007).

Als Schlussfolgerung der Studie ergibt sich, dass das Wachstum zwischen den Bundeswaldinventuren in den Jahren 1987 und 2002 in den untersuchten Straten über den langfristig zu erwartenden Werten lag, und damit die Möglichkeit besteht, dass die Zuwachsraten berechnet aus den Messungen der zwei Inventuren zu hohe Vorhersagewerte liefern könnten.

## 7. Summary

The presented work analyses in case studies the height growth and the radial growth in the years between the two only national forest inventories which were finished in the years 1987 and 2002, and compares them to previous and following periods. The growth rates calculated from these two inventories were much higher than expected before which raised the question if the period had growth conditions which favoured the tree growth of if this is a long term trend.

The focus is on Norway spruce and European beech in growth regions of the Northern Black Forest and the Northern Swabian Alp. Dominant trees are sampled with a combination of block and systematic sampling and then measured. For each site type three age classes of trees are sampled.

The sampled stands are the same used in Untheim (1996b) which allows for a combined used of data. The height growth is used in this work as an indicator for site conditions and representative changes in site condition while the radial growth is used as indicator for short term growth variations often cause by climatic conditions.

The results show that six of the nine Norway spruce strata have higher radial growth rates than expected between the years 1987 and 2002. The radial growth of these strata is two to eleven percent higher than expected. Only some of the older strata did not respond in this way. If you compare the period to the period before with the same length the eight out of nine strata are 2 % to 22 % higher between the years 1987 and 2002. Only the younger European beech strata show increased radial growth in this period by nine percent. Compared to the growth period before the growth is only 5 % increased.

In addition height growth curves were calculated with the Levakovic III formula in order to standardize the height growth and to later compare it. No increased height growth becomes obvious during the analysis contrary to the radial growth analysis. In addition a linear trend for increased site productivity was determined confirming the results of Untheim (1996) and Nothdurft (2007).

The study shows that the growth of the sampled trees was higher due to short term effects between the years 1987 and 2002. The results of this case suggest that the growth rates calculated from the two only national forest inventories might be overestimating the actual growth of the tree species. This raises the point that it is necessary to repeat the national forest inventories more frequently in order to predict the growth of the tree species more accurate or to use research plot data for updating existing yield curves.

## 8. Literaturverzeichnis

- Abetz, K. (1952): Forsteinrichtung und Neuaufstellung der Einheitswerte des forstwirtschaftlichen Vermögen. In: Allgemeine Forstzeitschrift, Jg. 30, S. 405–408.
- Abetz, P. (1976): Der h/d-Wert; mehr als ein Schlankheitsgrad. In: Forst- und Holzwirt, Jg. 19, S. 389–393.
- Abetz, P. (1983): Zur Interpretationssystematik von Wachstumsanalysen an Waldbäumen - Forstliche Anamnese. In: Tagungsband Sektion Ertragskunde, S. 5/1-5/10.
- Abetz, P. (1985): Ein Vorschlag zur Durchführung von Wachstumsanalysen im Rahmen der Ursachenforschung von Waldschäden in Südwestdeutschland. In: Allgemeine Forst und Jagdzeitung, Jg. 156, H. 9/10, S. 177–187.
- Assmann, E. (1955): Zur Bonitierung süddeutscher Fichtenbestände. In: Allgemeine Forstzeitschrift, Jg. 33, S. 61–64.
- Assmann, E. (1961): Waldertragskunde. Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbeständen. München Bonn Wien: BLV Verlagsgesellschaft. 490 S.
- Badeau, V.; Becker, M.; Bert, D.; Dupouey, J. L.; Lebourgeois, F.; Picard, J. F. (1996) Long-term growth trends of trees: Ten years of dendrochronological studies in France. In: Spiecker, Mielikäinen et al. (Hg.) – Growth Trends in European Forests, S. 167–182.
- Becker, M. (1989): The role of climate on present and past vitality of silver fir forests in the Vosges Mountains of Northeastern France. In: Canadian Journal of Forest Research, Jg. 19, S. 1110–1117.
- Becker, M.; Nieminen, T. M.; Geremia, F. (1994): Short-term variations and long-term changes in oak productivity in northeastern France. The role of climate and atmospheric CO<sub>2</sub>. In: Annales des Sciences Forestieres, Jg. 51, S. 477–492.
- Bleich, K.; Hädrich, F.; Hauffe, H. -K; Schlichting, E.; Zöttl, H. W.; and local colleagues (1986): Guidebook for a Landscape, Soils and Land Use Tour in the Federal Republic of Germany. Guidebook Tours D and E, Soils and Landscapes in Southern Germany Bayern and Baden-Württemberg. XIII. Congress of the International Society of Soil Science. Hamburg, Mitteilungen der Deutschen Bodenkundler, 49: 241 S.
- BMELV (2008): Bundeswaldinventur 2. Online verfügbar unter [www.bundeswaldinventur.de](http://www.bundeswaldinventur.de).
- Carmean, W. H. (1972): Site Index Curves for Upland Oaks in the Central States. In: Forest Science, Jg. 18, H. 2, S. 109–120.
- Carmean, W. H. (1975): Forest site quality evaluation in the United States. In: Brady, N. (Hg.): Advances in Agronomy. New York, San Francisco, London: Academic Press, Bd. 27, S. 209–269.

- Clutter, J. L.; Fortson, J. C.; Pienaar, L. V.; Brister, G. H.; Bailey, R. L. (1983): Timber Management - A Quantitative Approach. Malabar, Florida: John Wiley & Sons, Reprint Edition 1992. 333 S.
- Eidmann, F. (1961): Langperiodische Klimaänderung und ihr Einfluss auf ertragskundliche Tatbestände. In: Allgemeine Forst und Jagdzeitung, Jg. 132, S. 137–143.
- Eriksson, H.; Johansson, U. (1993): Yield of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in two consecutive rotations in southwestern Sweden. In: Plant and Soil, Jg. 154, S. 239–247.
- Gauer, J.; Aldinger, E. (2005): Waldökologische Naturräume Deutschlands. Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke mit Karte 1:1.000.000.: Verein für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung, Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung, 43 S.
- Gerecke, K. L. (1988): Herleitung und Anwendung von "Referenzbäumen" zur Beschreibung des Wachstumsgangs vorherrschender Tannen. Dissertation. Freiburg. Albert-Ludwigs-Universität. 141 S.
- Grey, D. C. (1989): Site Index - A Review. In: South African Journal of Forestry, H. 148, S. 28–32.
- Hasenauer, H.; Burkhart, H. E.; Sterba, H. (1994): Variation in potential volume yield of loblolly pine plantations. In: Forest Science, Jg. 40, S. 162–176.
- Hink, V. (1973): Das Wachstum von Fichte und Tanne auf den wichtigsten Standortseinheiten des Einzelwuchsbezirkes "Flächenschwarzwald" (Südwestwürttemberg-Hohenzollern). In: Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg, H. 41, S. 93 S.
- Hofmann, D. J., Butler, J. H., Tans, P. P. (2008): A new look at atmospheric carbon dioxide. In: Atmospheric Environment, Jg. 43, S. 2084 - 2086
- Hornbeck, J. W.; Smith, R. B.; Federer, C. A. (1988): Growth trends in 10 species of trees in New England, 1950-1980. In: Canadian Journal of Forest Research, Jg. 18, S. 1337–1340.
- Hübner, W.; Mühlhäußer, G. (1987): Fortschritte in der regionalen und vertikal-zonalen Gliederung im Wuchsgebiet Schwarzwald - Ein Zwischenbericht. In: Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde, H. 33, S. 27–35.
- Husch, B.; Miller, C. I.; Beers, T. W. (1982): Forest Mensuration. 3. Aufl. New York: John Wiley & Sons, Reprint Edition 1992. 407 S.
- Kahle, H. P.; Spiecker, H.; Unseld, R.; Pérez Martínez, P. J.; Prietzel, J.; Mellert, K. H. et al. (2008): Temporal trends and spatial patterns of height growth changes in relation to changes in air temperature and precipitation, and in relation to levels of foliar nitrogen and nitrogen deposition. In: Kahle, H. P.; Karjalainen, T.; Schuck, A.; Ågren, G. I.; Kellomäki, S.; Mellert, K. H.; Prietzel, J.; Rehfuess, K. E.; Spiecker, H. (Hg.): Causes

- and Consequences of Forest Growth Trends in Europe - Results of the Recognition Project. Leiden: Brill, S. 169-182
- Kahn, M. (1994): Modellierung der Höhenentwicklung ausgewählter Baumarten im Abhängigkeit vom Standort. München (Schriftenreihe der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität München und der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft). 221 S.
- Kenk, G.; Spiecker, H.; Diener, G. (1991): Referenzdaten zum Waldwachstum. In: KfK-PEF Forschungsbericht, H. 82, 59.S.
- Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg (2008): Webseite. Online verfügbar unter <http://www.wald-online-bw.de>.
- Mitscherlich, G. (1959): Fichtenwachstum und Ertragstafelfrage. In: Allgemeine Forstzeitschrift, Jg. 14, H. 28, S. 509–513.
- Moosmayer, H. -U (1957): Zur ertragskundlichen Auswertung der Standortsgliederung im Ostteil der Schwäbischen Alb, Diss. Univ. Freiburg, 118 S..
- Moosmayer, H. -U (1961): Langperiodische Klimaänderungen und ihr Einfluss auf ertragskundliche Tatbestände. Eine Stellungnahme zu dem gleichnamigen Aufsatz von F. Eidmann. In: Allgemeine Forst und Jagdzeitung, H. 132, S. 300–303.
- Moosmayer, H. -U (1970): Der Einfluss ertragskundlicher-standortkundlicher Forschungsergebnisse auf Bonitierung und Ertragsregelung bei der Forsteinrichtung in Baden-Württemberg. In: Allgemeine Forst und Jagdzeitung, Jg. 141, H. 4, S. 73–83.
- Moosmayer, H. -U; Schöpfer, W. (1972): Beziehung zwischen Standortsfaktoren und Wuchsleistung der Fichte. In: Allgemeine Forst und Jagdzeitung, H. 143, S. 203–215.
- Mühlhäußer, G.; Müller, S.; Stummer, G. (1985): Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke in Baden-Württemberg. Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag GmbH (Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke in der Bundesrepublik Deutschland). S. 3 - 21
- Müller, S.; Glatzel, K.; Jahn, R.; Schlenker, G.; Werner, J. (1967): Südwestdeutsche Waldböden im Farbbild. Stuttgart (Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg, 23: 68S).
- Newberry, J.D. (1991): A note on Carmean's estimate of height from stem analysis data. In: Forest Science, Jg. 37, H. 1, S. 368–369.
- Niepolla, J. (1993): Site classification in *Pinus sylvestris* L. forests in southern Finland. In: Sylva Fennica, Jg. 27, H. 1, S. 9–20.
- Nothdurft, A. (2007): Ein nichtlineares, hierarchisches und gemischtes Modell für das Baum-Höhenwachstum der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) in Baden-Württemberg. Dissertation: Georg-August Universität Göttingen. 148 S.
- Rapp, J.; Schönwiese, C. D. (1996): Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland 1891-1990. Frankfurt a. M.: Fachbereich Geowissenschaften der Johann-

- Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt, Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten: Serie B, Ser. B, Meteorologie und Geop. 5:, 253 S.
- Röhe, P., (1985): Untersuchungen über das Wachstum der Buche in Baden-Württemberg, Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg, Bd. 61, 126. S.
- Schadauer, K.: Growth trends in Austria. In: Spiecker, Mielikäinen et al. (Hg.) 1996 – Growth Trends in European Forests, S. 275–289.
- Schlenker, G.; Müller, S. (1973): Erläuterungen zur Karte der Regionalen Gliederung von Baden-Württemberg. I. Teil (Wuchsgebiete Neckarland und Schwäbische Alb). In: Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde, H. 23, S. 3–66.
- Schlenker, G.; Müller, S. (1978): Erläuterungen zur Karte der Regionalen Gliederungen von Baden-Württemberg. III. Teil (Wuchsgebiet Schwarzwald). In: Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde, H. 26, S. 3–52.
- Schweingruber, F.H. (1993): Jahrringe und Umwelt - Dendroökologie. Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, 474 S.
- Skovsgaard, J.P.; Henriksen, H. A. (1996): Increasing site productivity during consecutive generations of naturally regenerated and planted beech (*Fagus sylvatica* L.) in Denmark. In: Spiecker, H.; Mielikainen, K.; Köhl, M.; Skovsgaard, J.P. (Hg.): Growth Trends in European Forests - Studies From 12 Countries. Berlin: Springer (European Forest Institute Research Report). S. 89-97
- Speidel, G. (1972): Planung im Forstbetrieb: Grundlagen und Methoden der Forsteinrichtung. Hamburg: Verlag Paul Parey. 267 S.
- Spiecker, H. (1986): Das Wachstum der Tannen und Fichten auf Plenterwald-Versuchsflächen des Schwarzwaldes in der Zeit von 1950 bis 1984. In: Allgemeine Forst und Jagdzeitung, Jg. 157, H. 8, S. 152–164.
- Spiecker, H. (1987): Düngung, Niederschlag und der jährliche Volumenzuwachs einiger Fichtenbestände Südwestdeutschlands - Ergebnisse einer neuen Methode der Zuwachsermittlung. In: Allgemeine Forst und Jagdzeitung, Jg. 158, S. 70–76.
- Spiecker, H. (1992): Which trees represent stand growth? In: Bartholin, T.S.; Berglund, B.E.; Eckstein, D.; Schweingruber, F.H. (Hg.): Proceedings of the International Dendrochronological Symposium, Ystad, South Sweden, 3-9 September 1990, S. 308–312.
- Spiecker, H. (1994): Effects of environmental changes on growth dynamics in mixed stands. Proceedings from the symposium of the IUFRO working groups S4.01-03 and S4.01-04, April 25-29, 1994 in Lousa/Coimbra, Portugal., S. 239–246.
- Spiecker, H. (1995): Growth dynamics in a changing environment – long term observations. In: Plant and Soil, Jg. 168 – 169, S. 555-561
- Spiecker, H.; Mielikainen, K.; Köhl, M.; Skovsgaard, J.P. (Hg.) (1996): Growth Trends in European Forests - Studies From 12 Countries. Berlin: Springer (European Forest Institute Research Report), 372 S.

- Spiecker, H. (1999): Growth trends in European Forests. Do we have sufficient knowledge? In: Karjalainen, T.; Spiecker, H.; Laroussinie, O. (Hg.). Joensuu, Finland: EFI, Joensuu, Finland (EFI proceedings), Bd. 27, S. 157–169.
- Spurr, S. H.; Barnes, B. V. (1992): Forest Ecology. 3. Aufl. New York: The Ronald Press Company. 687 S.
- Tojic, K., Spiecker, H. (2008): Einordnung des Wachstums von Buche (*Fagus sylvatica* L.) und Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.) im Zeitraum zwischen den zwei Bundeswaldinventuren (1987 und 2002) in den längerfristigen Kontext, In: Tagungsband Sektion Ertragskunde, S. 158-168
- Unthelm, H. (1996a): Has site productivity changed? A case study in the Eastern Swabian Alb, Germany. In: Spiecker, H.; Mielikainen, K.; Köhl, M.; Skovsgaard, J.P. (Hg.): Growth Trends in European Forests - Studies From 12 Countries. Berlin: Springer (European Forest Institute Research Report), S. 133–147.
- Unthelm, H. (1996b): Zur Veränderung der Produktivität von Waldstandorten. Freiburg i. Brsg. (Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, 198). 239 S.
- Villinger, B. (1979): Regionale Waldbaurichtlinie für die Ostalb. In: Landesforstverwaltung Baden-Württemberg: Sammlung regionaler waldbaulicher Übersichten und Richtlinien. Unveröffentlicht., 67 S.
- Wiedemann, E. (1925): Zuwachsrückgang und Wuchsstockungen der Fichte in den mittleren und unteren Höhenlagen der sächsischen Staatsforsten. 2. Aufl. Tharandt, 190 S.
- Yue, C.F., Kohnle, U. (2009): Langfristige Wachstumstrends in baden-württembergischen Wäldern. Vortrag am 01.12.2009 an der FVA Freiburg
- Zeide, B. (1993): Analysis of growth equations. In: Forest Science, Jg. 39, S. 594–616.

## 9. Anhang

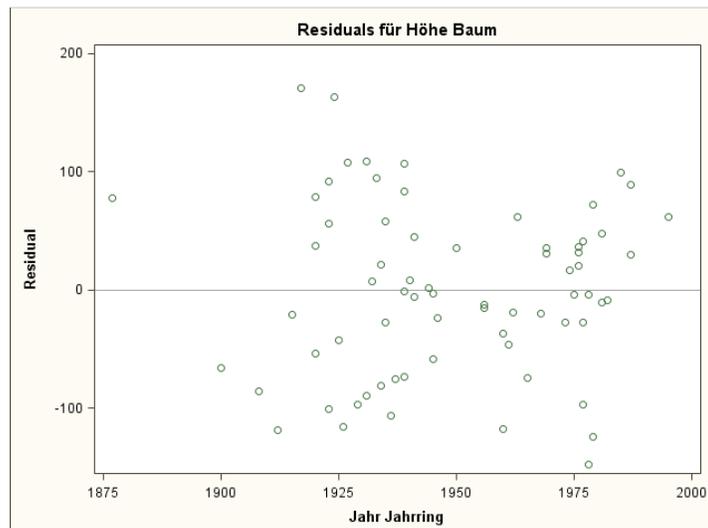
**Tabelle 15:** Residuenplots der linearen Regression zur Bestimmung des Trends zur veränderten Standortsproduktivität.

Baumart Alter Residuenplots

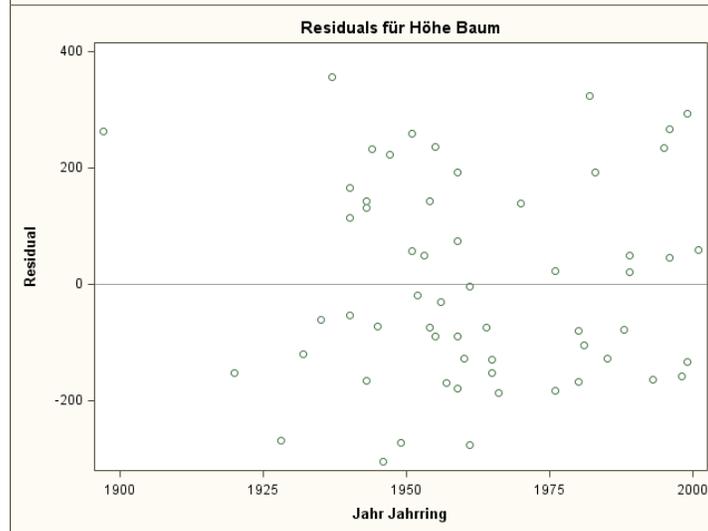
&

Standort

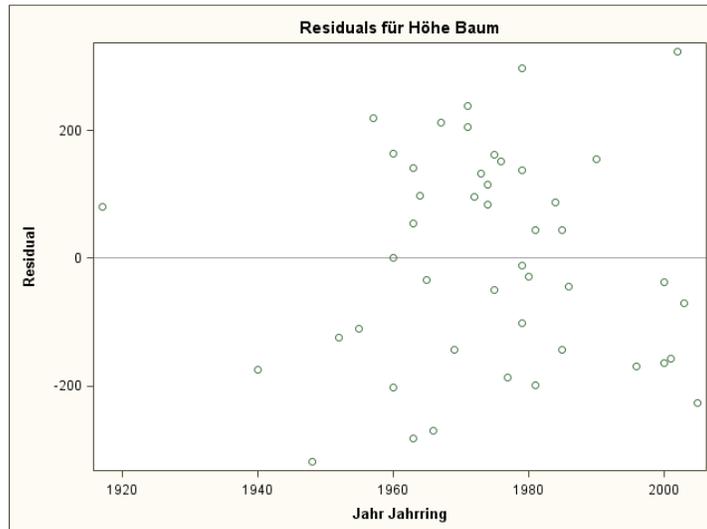
Fi KVL 10



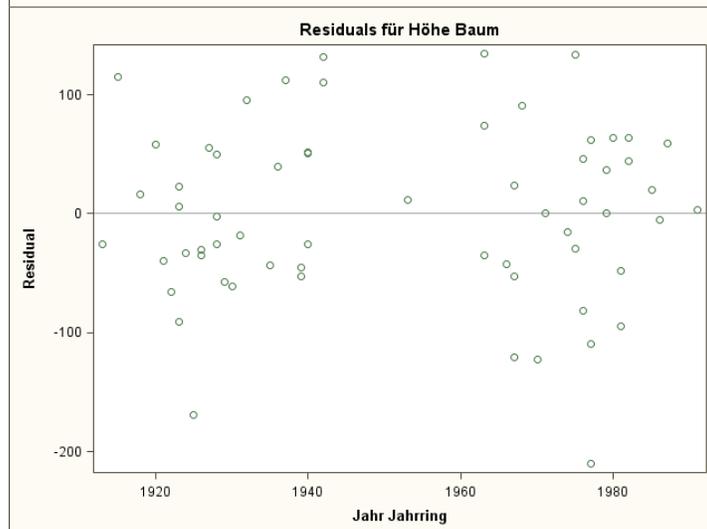
Fi KVL 30



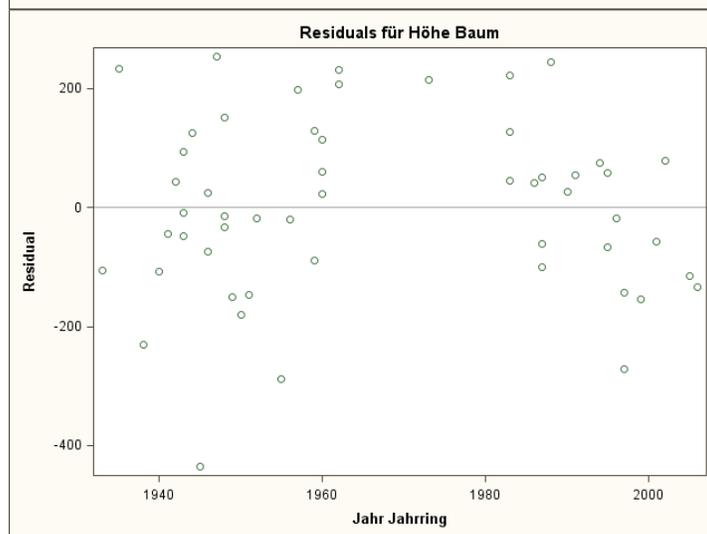
Fi KVL 50



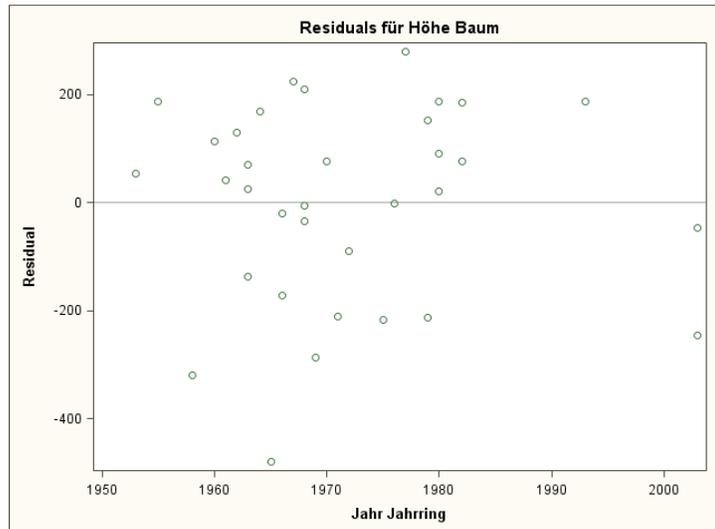
Fi FSchl 10



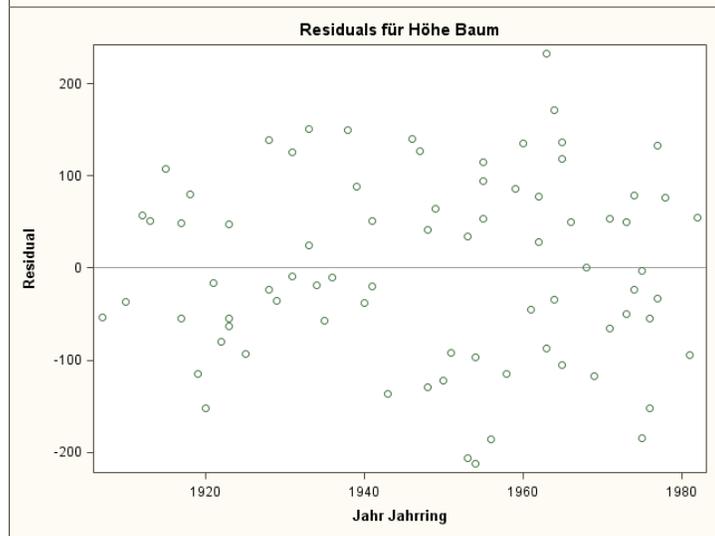
Fi FSchl 30



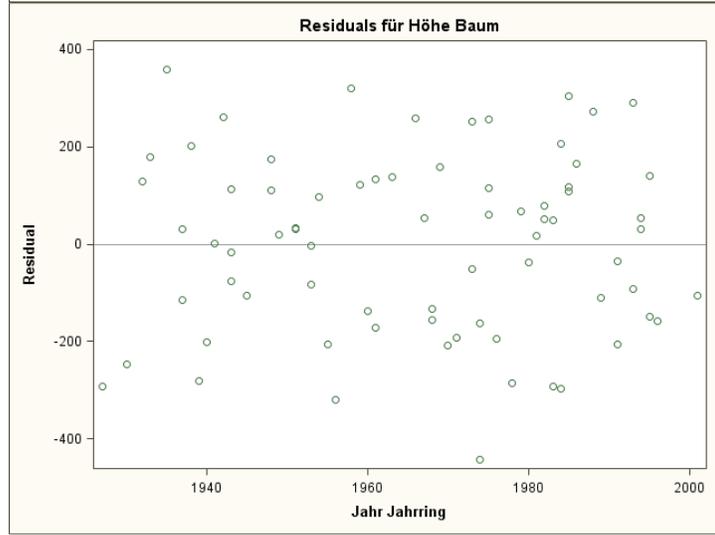
Fi FSchl 50



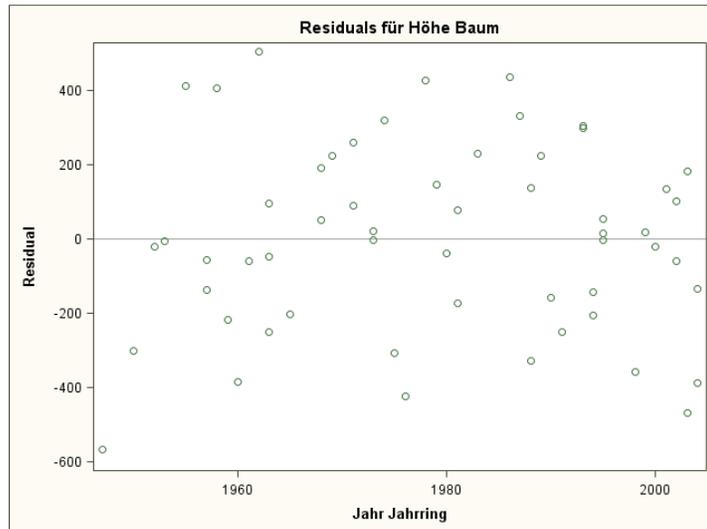
Fi IS 10



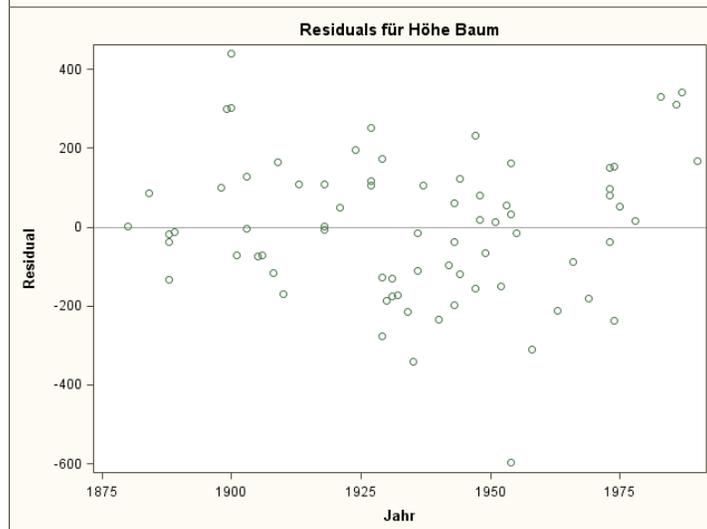
Fi IS 30



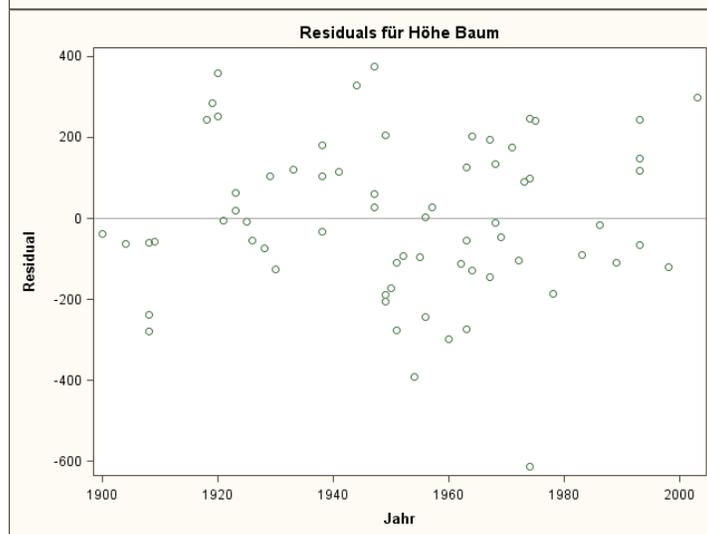
Fi IS 50



Bu KVL 30



Bu KVL 50



Bu  
KVL

80

