

## **Zuwachsreaktionen von Waldbäumen auf Trockenstress**

### **- Erste Ergebnisse retrospektiver Analysen in verschiedenen Höhenlagen des Südschwarzwaldes unter besonderer Berücksichtigung der Jahre 1947, 1976 und 2003 -**

Hans-Peter Kahle, Arno Mutschler, Heinrich Spiecker  
Institut für Waldwachstum, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

#### **1. Einleitung und Fragestellung**

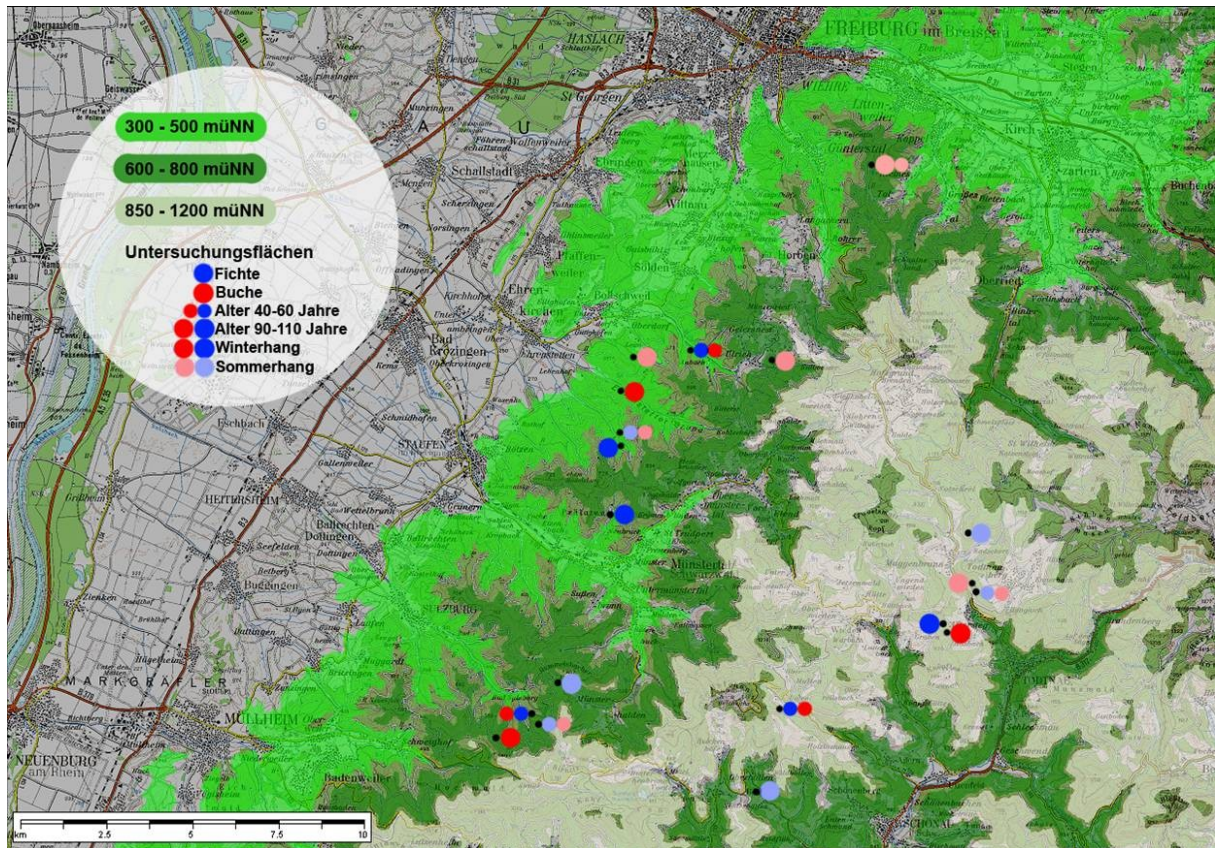
Klimaforscher prognostizieren für Südwestdeutschland eine Zunahme der Häufigkeit und Intensität von trockenwarmen Sommern bereits innerhalb der kommenden Jahrzehnte (z.B. Arbeitskreis KLI-WA 2006, Parlow et al. 2006, Stock 2005). Erfahrungen aus vergangenen Trockenphasen belegen, dass in den gemäßigten Breiten erhöhte Temperaturen und verringerte Wasserverfügbarkeit massive Auswirkungen auf das Wachstum und die Vitalität von Waldbäumen haben (Becker et al. 1989, Eichkorn 1986, Kahle und Spiecker 1996, Picard 1995, Spiecker 1991). In der jüngeren Vergangenheit waren in Süddeutschland vor allem die Sommer der Jahre 1947, 1976 und 2003 durch solche außergewöhnlichen Witterungsbedingungen gekennzeichnet (Cramer und Cramer-Middendorf 1984, Schindler und Mayer 2007). Während es jedoch nach der frühsommerlichen Trockenheit 1976 in Süddeutschland zu Schäden und einem verbreiteten Absterben von Bäumen auch in den Hochlagen der Mittelgebirge kam (Bosch et al. 1983, Kirchner et al. 1992, Mössmer 1986, Prinz 1987, Zöttl und Mies 1983), zeigen erste Ergebnisse von Wachstumsuntersuchungen in der Schweiz und in Südwestdeutschland (Jolly et al. 2005, Kahle 2006, Lorenz et al. 2004), dass von der Hitze und Trockenheit im Sommer des Jahres 2003 in erster Linie die Tieflagen betroffen waren und dort erhebliche Schäden und große Zuwachseinbußen zu verzeichnen sind.

In der vorgelegten Untersuchung wird dargestellt, inwieweit sich die Lufttemperatur- und Niederschlagsanomalien im Südschwarzwald in Abhängigkeit von der Höhenlage zwischen den Jahren 1947, 1976 und 2003 unterscheiden, und ob sich die extremen Witterungsbedingungen in diesen Jahren auf das Dickenwachstum von Fichten und Buchen in verschiedenen Höhenlagen und Hangexpositionen im Südschwarzwald unterschiedlich ausgewirkt haben. Es handelt sich dabei um erste Ergebnisse des bis Mitte 2007 projektierten Kooperationsforschungsvorhabens zwischen dem Institut für Waldwachstum (IWW) der Universität Freiburg und der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt des Landes Baden-Württemberg, Abteilung Waldökologie, mit dem Thema „Auswirkungen extrem warmer und trockener Witterungsbedingungen auf das Wachstum von Fichten und Buchen entlang von Höhengradienten im Südschwarzwald - STA<sup>T</sup>RO“. In dem Vorhaben werden die Auswirkungen extrem trocken-warmer Witterungsverhältnisse auf das Wachstum von Fichten und Buchen unter Berücksichtigung des Baumalters und des Standorts retrospektiv untersucht. Aus der Kenntnis baumarten- und standortspezifischer Zuwachsreaktionen auf Trockenstress sollen sich erweiterte Interpretationsmöglichkeiten für die räumliche Differenzierung der Gefährdung der Wälder ergeben. Die Untersuchung der zeitlichen Dynamik der Klima-Zuwachs-Zusammenhänge auf der Grundlage langfristiger Messreihen gewinnt angesichts der sich rasch vollziehenden Umweltveränderungen zunehmend an Bedeutung.

#### **2. Datengrundlage**

Entsprechend des Untersuchungsansatzes erfolgte die Auswahl der Untersuchungsstandorte in den Höhenstufen kollin (Höhenrichtwert: 400 m üNN), submontan (700 m üNN) und montan (1.000 m üNN) des Südschwarzwalds. Für jede Höhenstufe wurden Standorte in S- bis W-Exposition (Sommerhang) und N- bis O-Exposition (Winterhang) ausgewählt (siehe Abb. 1). Alle Untersuchungsstandorte gehören der im Südschwarzwald weit verbreiteten Standorteinheit „mäßig-frischer lehmig-grusiger Hang“ an, und weisen damit ähnliche bodenphysikalische und bodenchemische Eigenschaften auf.

Die Untersuchungsbäume wurden in gleichaltrigen Reinbeständen bzw. in Bestandespartien mit Reinbestandscharakter ausgewählt. Die Auswahl der Untersuchungsbäume erfolgte in der vorherrschenden und herrschenden Kronenklasse. An jedem Untersuchungsstandort wurden zwei Altersklassen beprobt: jüngere Bäume in einem Zielaltersbereich zwischen 40-60 im Mittel 50 Jahre, und ältere Bäume zwischen 80-100 im Mittel 90 Jahre.



**Abb. 1: Lage der Untersuchungsstandorte im Südschwarzwald.**

Dazu wurden in jedem Untersuchungsbestand an dem Kollektiv der vorherrschenden bis herrschenden Bäume orientierende Durchmessermessungen durchgeführt. Auf dieser Grundlage wurden, unter weiterer Beachtung der Standorts-, Bestandes- und Baumauswahlkriterien, jeweils fünf Bestandesbäume ausgewählt die einen ähnlichen Brusthöhendurchmesser und keine äußerlich erkennbaren Schäden wie z.B. Kronenbruch oder Stammverwundung, etwa in Folge von Rückeschäden, aufwiesen. Im Rahmen des Projektes STA<sub>T</sub>RO sollen auf diese Weise insgesamt 120 Untersuchungsbäume ausgewählt und analysiert werden (2 Baumarten, 2 Alterstufen, 3 Höhenstufen, 2 Expositionen, 5 Wiederholungen). Für die vorliegende Untersuchung wurden von den bis Ende Mai 2007 vermessenen Untersuchungsbäumen 40 ausgewählt (s. Tab. 1). Zusätzlich wurden 15 Untersuchungsbäume (10 Buchen und 5 Douglasien) die im Oktober 2006 im Stadtwald Freiburg aus einem Bestand in submontaner Höhenlage (750 m üNN) ausgewählt wurden in die vorliegende Auswertung einbezogen. In diesem Teilkollektiv sind neben vorherrschenden auch beherrschte Buchen vertreten (s. Tab. 1). Zusätzlich zu den im Rahmen des Projektes STA<sub>T</sub>RO erhobenen Daten wurden Radialzuwachsdaten aus dem Gebiet Südschwarzwald aus früheren am IWW durchgeführten Forschungsvorhaben einbezogen (s. Tab. 2).

**Tab. 1:** Informationen zu den Untersuchungsstandorten und -bäumen aus dem Projekt STATRO. Je Variante  $n=5$  Untersuchungsbäume. Für Brusthöhendurchmesser in Rinde ( $d_{1,3}$ ), Baumhöhe und Alter (bezogen auf Brusthöhe zum Einschlagszeitpunkt: Herbst 2006-Frühjahr 2007) sind jeweils Mittelwerte angegeben. Kronenklassen (KK): 1: vorherrschend, 2: herrschend, 3: mitherrschend, 4: beherrscht.

Baumart	Höhenlage		Exposition		$d_{1,3}$	Höhe	Alter	KK
		m üNN		°	cm	m	a	
Fichte	kollin	400	Sommerhang	250	31.3	27.4	61	1-2
	kollin	400	Winterhang	35	28.1	27.9	41	1-2
	submontan	700	Sommerhang	220	30.0	24.4	63	1-2
	submontan	700	Winterhang	25	25.2	24.7	39	1-2
	montan	1000	Sommerhang	255	29.3	22.3	48	1-2
	montan	1000	Winterhang	40	40.1	24.0	53	1-2
Buche	montan	1000	Sommerhang	255	21.6	17.7	57	1-2
	montan	1000	Winterhang	40	22.2	18.3	51	1-2
	submontan	750	Sommerhang	275	56.8	28.8	103	1
	submontan	750	Sommerhang	275	28.3	21.4	86	4
Douglasi e	submontan	750	Sommerhang	275	47.6	30.2	42	1-2

**Tab. 2:** Informationen zu den Untersuchungsstandorten und -bäumen aus früheren Forschungsprojekten am IWW. Je Variante  $n=5$ . Alter bezogen auf Brusthöhe zum Einschlagszeitpunkt: Herbst 1995.

Baumart	Höhenlage		Exposition	$d_{1,3}$	Höhe	Alter	KK
		m üNN		cm	m	a	
Fichte	kollin	250	Winterhang	49.5	33.9	84	1-2
	kollin	460	Sommerhang	44.0	31.5	115	1-2
	montan	950	Sommerhang	55.5	37.1	146	1-2
	montan	950	Winterhang	36.4	62.8	122	1-2
	hochmontan	1350	Sommerhang	47.5	26.0	133	1-2
	hochmontan	1350	Winterhang	50.4	27.7	121	1-2
Buche	kollin	250	Sommerhang	42.4	25.1	73	1-2
	kollin	450	Sommerhang	54.2	30.7	108	1-2
	kollin	450	Winterhang	51.0	36.4	91	1-2
	submontan	650	Sommerhang	26.8	-	182	1-2
	submontan	700	Sommerhang	-	-	148	1-2
	submontan	850	Winterhang	51.0	39.3	129	1-2
	montan	950	Sommerhang	52.1	29.2	163	1-2
	montan	950	Winterhang	52.2	28.0	165	1-2
	hochmontan	1350	Sommerhang	37.4	18.8	141	1-2
	hochmontan	1350	Winterhang	37.9	22.2	162	1-2

Die meteorologischen Messreihen wurden von im Untersuchungsgebiet gelegenen Stationen aus dem Messnetz des Deutschen Wetterdiensts (DWD) bezogen. Die monatlichen Lufttemperatur- und Niederschlagsdaten von 78 DWD-Stationen im Gebiet des südlichen Oberrheins und Südschwarzwalds im Höhenbereich zwischen 198 m üNN (Breisach) und 1.486 m üNN (Feldberg) wurden von der FVA Baden-Württemberg zur Verfügung gestellt. Die Daten der Station Basel stammen aus dem Messprogramm der Meteo-Swiss (<http://www.meteoswiss.ch>).

### 3. Methodik

#### 3.1 Messmethoden

Am stehenden Untersuchungsbaum wurden Brusthöhendurchmesser, Baumhöhe und Kronenlänge erfasst. Zusätzlich wurde die Kronenschirmfläche über acht Kroneneckpunkte vermessen sowie die Konkurrenzsituation über die Entfernung, Richtung und Dimension der Nachbarbäume quantifiziert. Das jährliche (Fichte) bzw. periodische (Buche) Höhen- und jährliche Dickenwachstum der Untersuchungs bäume wurde mittels Stammanalyse retrospektiv erhoben. Einem definierten Entnahmeraster folgend wurden je nach Stammlänge zwischen 5 und 10 Stammscheiben in verschiedenen Schafthöhen entnommen. Die Vermessung der Stammscheiben erfolgte im Jahrringmesslabor des Instituts für Waldwachstum mit den dort vorhandenen bildanalysegestützten Messsystemen. Die Radialzuwächse auf den Stammscheiben aus Brusthöhe wurden entlang von acht Messradien, diejenigen der höheren Stammscheiben entlang von vier Radien, vermessen und nach der Qualitätskontrolle unter Verwendung des quadratischen Mittels zu jährlichen Radialzuwachsdaten aggregiert. Für die vorliegende Untersuchung wurden nur die Radialzuwachsdaten der Stammscheiben aus Brusthöhe verwendet. Die Gesamtauswertung unter Einbeziehung aller Untersuchungs bäume und Parameter erfolgt nach Vorliegen sämtlicher im Projekt erhobener Daten.

#### 3.3 Methoden zur Analyse der Zuwachsdaten

Zur Analyse der Radialzuwachsreaktionen wurde ein Dummy-Variablen Modell verwendet das speziell für die Analyse kombinierter Zeitreihen- und Querschnittsdaten geeignet ist. Das in der Software GAUSS<sup>®</sup> Library Time Series implementierte „Pooled Time-Series Cross-Section Regression“ Modell wurde in der folgenden Modifikation verwendet :

$$y_{it} = \sum_{j=1}^N \beta_{1i} D_{jt} + \beta_2 x_{it} + e_{it} \quad (\text{Gl. 1})$$

wobei  $\beta_{1i}$  die Koeffizienten der y-Achsenabschnitte der  $i$ -ten Gruppe ( $i = 1, \dots, K$ ),  $D_{jt}$  die zum  $j$ -ten Beobachtungswert ( $j = 1, \dots, N$ ) und  $t$ -ten Beobachtungszeitpunkt  $t$  ( $t = 1, \dots, T$ ) gehörende Dummy-Variable,  $\beta_2$  den für alle Gruppen einheitlichen Steigungs-/Regressionskoeffizienten,  $x_{it}$  eine gruppenspezifische zeitvariable Kovariable (erklärende Variable), und  $e_{it}$  unabhängig und identisch verteilte Zufallsvariablen mit  $E[e_{it}] = 0$  und  $E[e_{it}^2] = \sigma_e^2$  darstellen. Die Dummy-Variablen nehmen entweder den Wert 0 oder 1 an:

$$D_{jt} = \begin{cases} 1 & \text{für } j = i \\ 0 & \text{für } j \neq i \end{cases}$$

Das heißt, dass die zu jedem Individuum  $j$  der Gruppe  $i$  korrespondierende Dummy-Variable  $D_{jt}$  den Wert 1, und für alle anderen nicht zu dieser Gruppe gehörenden Individuen den Wert 0 annimmt. Die Prüfung der Hypothesen auf Gleichheit bzw. Ungleichheit der zu den Dummy-Variablen korrespondierenden y-Achsenabschnitts-Koeffizienten:

$H_0: \beta_{11} = \beta_{12} = \dots = \beta_{1k}$        $H_1: \text{die } \beta_{1k} \text{ sind nicht alle gleich,}$

erfolgt auf der Basis einer F-Statistik mit [(N-1), (NT-N-K)] Freiheitsgraden.

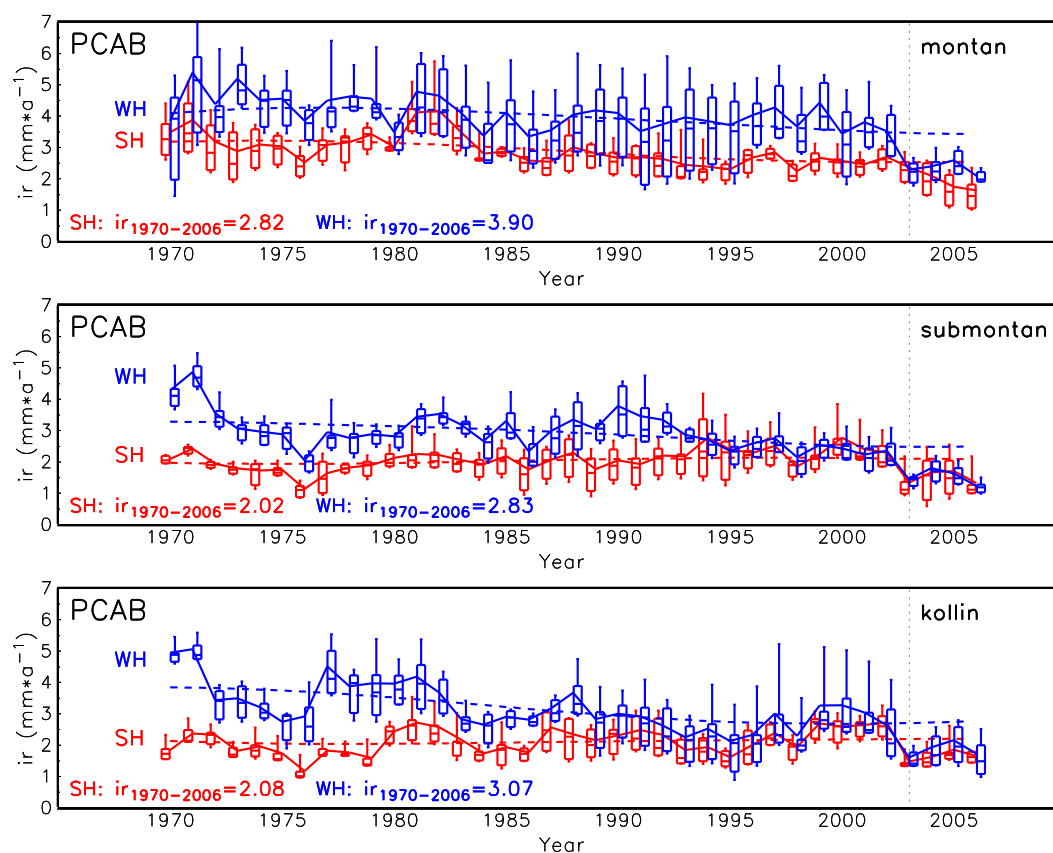
Ob es sich bei den  $\beta_{1i}$ -Koeffizienten um nicht-stochastische Koeffizienten - und damit, wie in Gl. 1 dargestellt, um ein Regressionsmodell mit festen Effekten - oder aber um unabhängige Zufallsvariablen mit einem Mittelwert von  $\bar{\beta}_1$  und einer Varianz von  $\sigma_{\beta_1}^2$  handelt - Regressionsmodell mit zufälligen Effekten - wurde mit einem Hausman-Test geprüft (1978). Weist die Teststatistik auf ein solches Fehlerkomponentenmodell hin, ist dies an der betreffenden Stelle kenntlich gemacht.

In den hier geschätzten Regressionsmodellen stellen die Radialzuwachsreaktionen in den Jahren 1947, 1976 und 2003 die abhängigen y-Variablen dar. Als unabhängige x-Variable dient der mittlere Radialzuwachs der jeweiligen 10-jährigen Vorperiode. Anhand der einzeln und in Kombination verwendeten Gruppierungsmerkmale Baumart, Höhenlage, Exposition, Kronenklasse und Ereignisjahr wurden die verschiedenen Gruppierungen im Hinblick auf Homogenität bzw. Heterogenität der Radialzuwachsreaktionen getestet. Ist die für eine bestimmte Gruppierung errechnete Teststatistik größer als der dem gewählten Signifikanzniveau entsprechende tabellierte kritische F-Wert, kann die Null-Hypothese verworfen und gefolgert werden, dass sich die Zuwachsreaktionsfunktionen der betreffenden Gruppen unterscheiden.

#### 3.2 Methoden zur Analyse der Klimadaten

Die monatlichen Beobachtungswerte der meteorologischen Parameter Lufttemperatur und Niederschlag der ausgewählten Klimamessstationen wurden mit klimatistischen Standardverfahren aufbereitet und analysiert (Schönwiese 1992). Dazu wurden die Zeitreihen zunächst nach der Zeitreihenlänge sortiert, und ausgehend von den längsten Messreihen die Datenlücken aller weiteren Messreihen schrittweise über monatsweise

Regressionsschätzungen durch Inter- bzw. Extrapolation geschlossen und auf einheitliche Länge ergänzt. Die Abhängigkeit der monatlichen Klimaparameter von der Höhenlage wurde über ein polynomiales Regressionsmodell 2. Grades geschätzt.



**Abb. 2:** Box-Plots der jährlichen Radialzuwächse der Fichten (PCAB) von Sommer- (SH, rot) und Winterhängen (WH, blau) der kollinen (unten), submontanen (Mitte) und montanen (oben) Höhenstufe des Südschwarzwaldes (jeweils  $n=5$  Untersuchungsbäume). Jede Box kennzeichnet den Wertebereich in dem 50% der Beobachtungen liegen (Min- und Max-Werte sind durch Balken, der Median ist mit einer horizontalen Linie innerhalb der Boxen gekennzeichnet). Die Mittelwerte sind durchgezogen und die mittleren Trendkurven (Spline 50%-Frequenzschwelle: 20 Jahre) sind gestrichelt eingezeichnet. Das Jahr 2003 ist mit einer gepunkteten vertikalen Linie markiert.

## 4. Ergebnisse

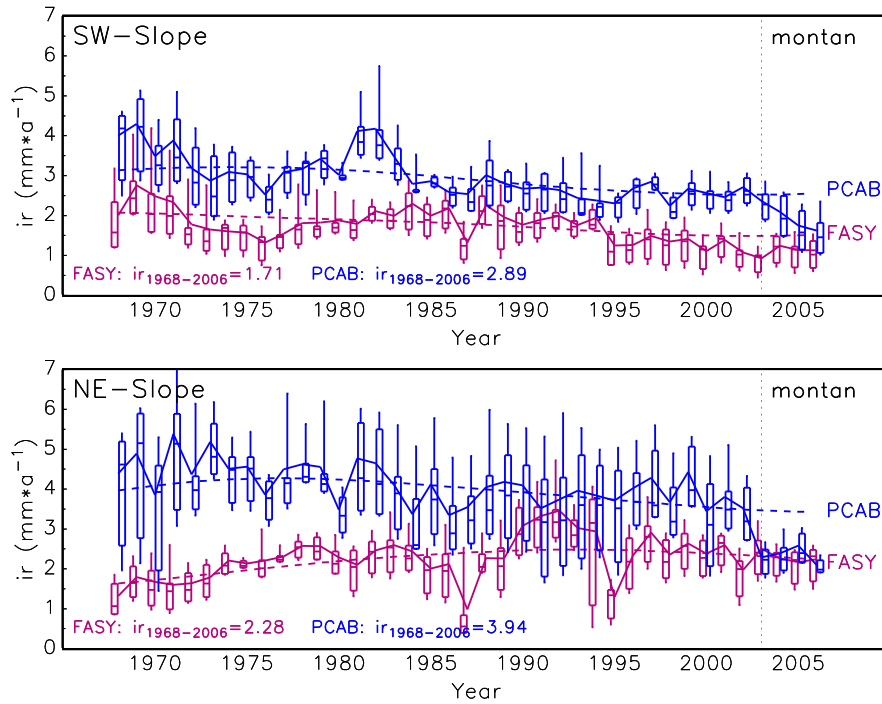
### 4.1 Radialzuwachsverläufe von Fichten, Buchen und Douglasien bis zum Jahr 2006

Abbildung 2 stellt die jährlichen Radialzuwächse der Fichtenkollektive von Sommer- und Winterhängen der kollinen, submontanen und montanen Höhenstufe des Südschwarzwaldes dar. Der mittlere jährliche Radialzuwachs im gemeinsamen Überlappungszeitraum (1970-2006) beträgt in der kollinen, submontanen und montanen Höhenstufe am Sommerhang 2.08 mm, 2.02 mm und 2.82 mm, und am Winterhang 3.07 mm, 2.83 mm, und 3.90 mm.

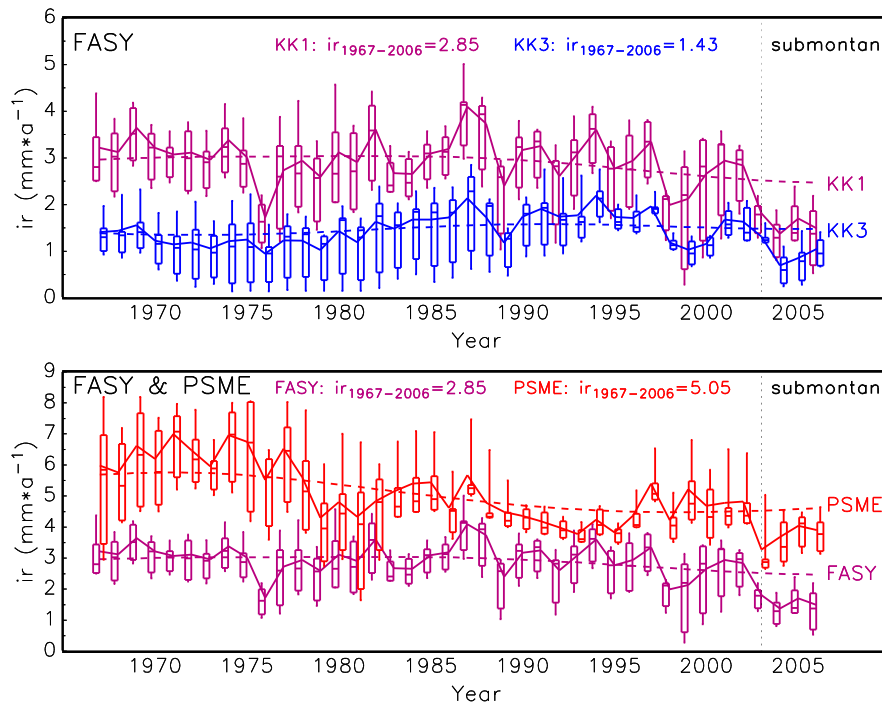
In Abbildung 3 sind die jährlichen Radialzuwächse von Buchen und Fichten von einem Sommer- und einem Winterhang der montanen Höhenstufe des Südschwarzwaldes gegenübergestellt. Der mittlere jährliche Radialzuwachs im gemeinsamen Überlappungszeitraum (1968-2006) beträgt für Buche am Sommer- und Winterhang 1.71 mm bzw. 2.28 mm und für Fichte 2.89 mm bzw. 3.94 mm.

Die jährlichen Radialzuwächse von Buchen der Kronenklasse (KK) 1 und 3 (oben) und von Buchen (KK1) und Douglasien (unten) aus einem west-exponierten Waldbestand in 750 m üNN sind in Abbildung 4 gegenübergestellt. Der mittlere jährliche Radialzuwachs im gemeinsamen Überlappungszeitraum (1967-2006) beträgt für Buche KK1 und KK3 2.85 mm bzw. 1.43 mm und für Douglasie 5.05 mm.





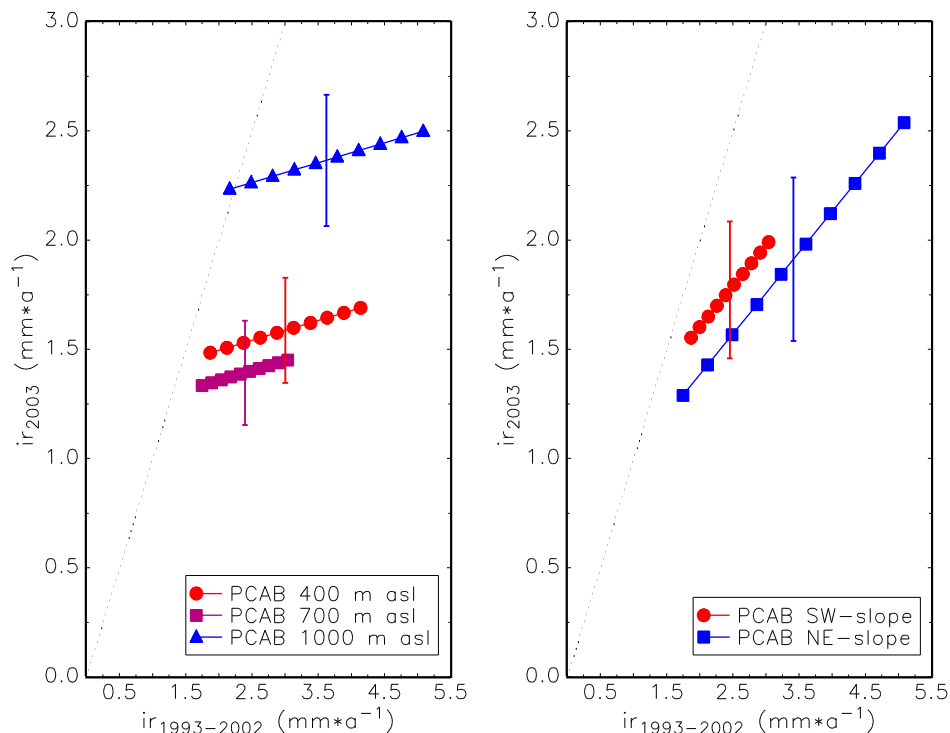
**Abb. 3:** Box-Plots der jährlichen Radialzuwächse von Buchen (FASY) und Fichten (PCAB) von einem Sommer- (SW, oben) und einem Winterhang (NE, unten) der montanen Höhenstufe des Südschwarzwaldes (jeweils  $n=5$ ).



**Abb. 4:** Oben: Box-Plots der jährlichen Radialzuwächse von Buchen (FASY) der Kronenklasse 1 (KK1) und 3 (KK3) (jeweils  $n=5$ ). Unten: Jährliche Radialzuwächse von Buchen (FASY KK1) und Douglasien (PSME) (jeweils  $n=5$ ).

#### 4.2 Radialzuwachsreaktionen von Fichten von Sommer- und Winterhängen in verschiedenen Höhenlagen im Jahr 2003

Abbildung 5 stellt die mit dem Dummy-Variablen Modell geschätzten Radialzuwächse von Fichten im Jahr 2003 in Abhängigkeit vom mittleren Radialzuwachs der 10-jährigen Vorperiode (1993-2002) dar. Für die Stratifizierung nach Höhenlage werden gesicherte Unterschiede in den  $y$ -Achsenabschnitten nachgewiesen (Abb. 5 links). Über alle Höhenlagen hinweg hat die Hangrichtung SW oder NE dagegen keine nachweisbaren Einfluss auf die Radialzuwachsreaktion der untersuchten Fichten im Trockenjahr 2003 (Abb. 5 rechts). Die Radialzuwachsreaktion im Jahr 2003 ist nach der Höhenstratifizierung (links) unabhängig, nach der Expositionsstratifizierung (rechts) dagegen signifikant vom Radialzuwachs niveau der 10-jährigen Vorperiode abhängig. Danach fällt die relative Zuwachsreduktion im Jahr 2003 bei geringem Zuwachsniveau geringer aus als bei hohem Zuwachsniveau, d.h. je höher das Zuwachsniveau umso stärker ist der relative Zuwachseinbruch.



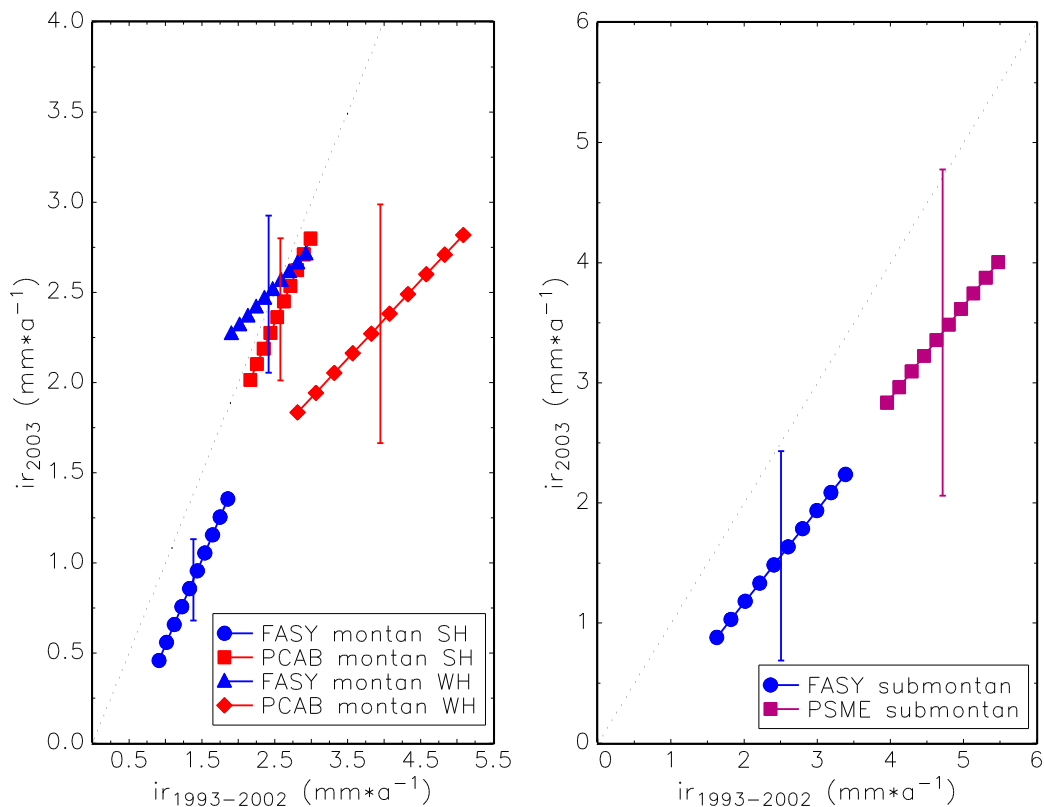
**Abb. 5:** Mit dem Dummy-Variablen Modell geschätzter Radialzuwachs von Fichten (PCAB) im Jahr 2003 ( $ir_{2003}$ ) in Abhängigkeit vom mittleren Radialzuwachs der 10-jährigen Vorperiode ( $ir_{1993-2002}$ ). Links: Stratifizierung nach Höhenlage (je Höhenstratum  $n=10$ ). Die Dummy-Variablen unterscheiden sich ( $F(2,26)=15.982$ ,  $p=0.000$ ), der Regressionskoeffizient  $\beta_2$  ist nicht signifikant von Null verschieden ( $t(26)=1.027$ ,  $p=0.314$ ). Rechts: Stratifizierung nach Hangexposition (je Expositionsstratum  $n=15$ ). Die Dummy-Variablen unterscheiden sich nicht ( $F(1,27)=1.454$ ,  $p=0.238$ ),  $\beta_2$  ist signifikant von Null verschieden ( $t(27)=3.130$ ,  $p=0.004$ ). Die Fehlerbalken markieren jeweils den Bereich  $\pm 1$  Standardfehler des Mittelwerts. Der dargestellte  $x$ -Wertebereich entspricht dem empirischen Wertebereich.

#### 4.3 Radialzuwachsreaktionen von Buchen der Kronenklassen 1 und 3 im Jahr 2003

Der Test auf Homogenität der Radialzuwachsreaktionen im Jahr 2003 von Buchen der Kronenklasse 1 und 3 hat ergeben, dass sich die  $y$ -Achsenabschnitte beider Kollektive nicht unterscheiden ( $F(1,7)=0.3177$ ,  $p=0.591$ ). Der Radialzuwachs im Jahr 2003 ist bei beiden Kollektiven unabhängig vom mittleren Zuwachsniveau im Zeitraum 1993-2002 ( $t(7)=1.956$ ,  $p=0.090$ ).

#### 4.4 Radialzuwachsreaktionen von Buchen, Fichten und Douglasien im Jahr 2003

In Abbildung 6 sind die mit dem Dummy-Variablen Modell geschätzten Radialzuwächse im Jahr 2003 von Buchen und Fichten (montan Sommer- und Winterhang; links) und von Buchen und Douglasien (submontan; rechts) dargestellt. Am Winterhang entspricht der mittlere Radialzuwachs der Buchen im Jahr 2003 annähernd dem mittleren Zuwachsniveau der Periode 1993-2002 (vgl. gepunktete Diagonale), während die Fichten einen deutlichen Zuwachseinbruch im Vergleich zur Referenzperiode zeigen, der Unterschied ist signifikant. Es besteht kein gesicherter Unterschied zwischen den Buchen und Fichten am Sommerhang (Abb. 6 links) sowie zwischen Buchen und Douglasien (Abb. 6 rechts).



**Abb. 6:** Geschätzter Radialzuwachs von Buchen (FASY) und Fichten (PCAB) (links) und von Buchen und Douglasien (PSME) (rechts) im Jahr 2003 ( $ir_{2003}$ ). Die Radialzuwachsreaktionen von Buchen und Fichten sind am Winterhang (WH) verschieden ( $F(1,7)=6.458$ ,  $p=0.039$ ), am Sommerhang (SH) nicht ( $F(1,7)=3.527$ ,  $p=0.103$ ) (links). Die Zuwachsreaktionen von Buchen und Douglasien unterscheiden sich nicht ( $F(1,7)=0.066$ ,  $p=0.804$ ) (rechts). Die Regressionskoeffizienten  $\beta_2$  sind in allen Fällen signifikant von Null verschieden (links SH:  $t(7)=6.161$ ,  $p=0.000$ , WH:  $t(7)=2.607$ ,  $p=0.039$ ; rechts:  $t(7)=2.618$ ,  $p=0.035$ ) (je Stratum  $n=5$ ).

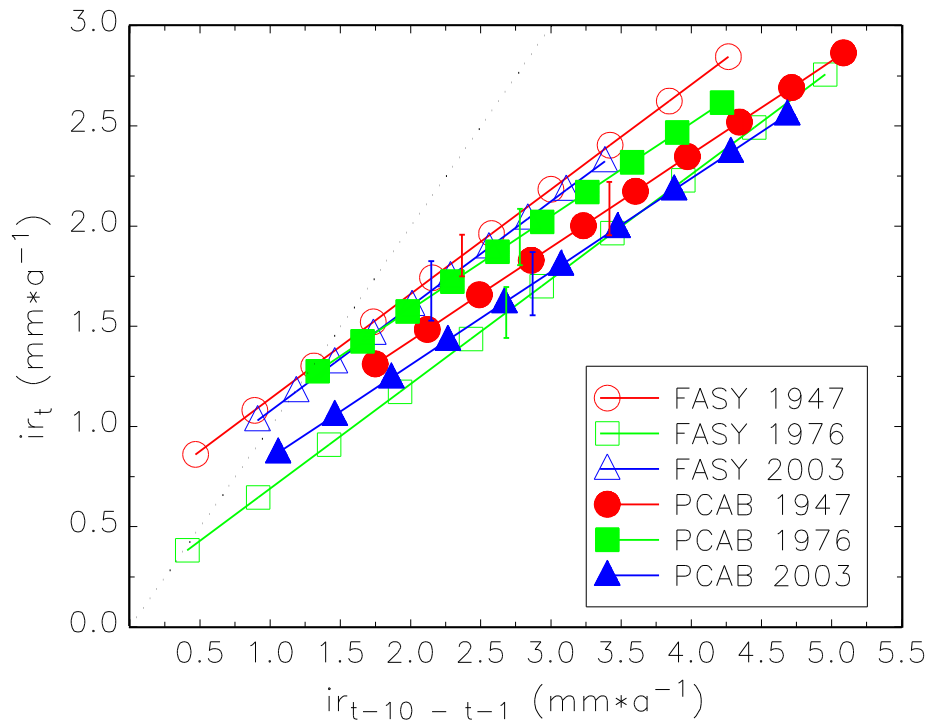
#### 4.4 Radialzuwachsreaktionen von Buchen und Fichten in den Jahren 1947, 1976 und 2003

In einem Gesamtmodell für Buche und Fichte wurde getestet, ob sich die Radialzuwachsreaktionen in den Jahren 1947, 1976 und 2003 zwischen den Buchen- und Fichtenuntersuchungsbäumen unterscheiden. Das entsprechende Dummy-Variablen Modell weist keine auf dem 5%-Niveau gesicherten Unterschiede zwischen beiden Baumarten nach. Die Unterschiede in den Zuwachsreaktionen zwischen den getesteten Jahren sind größer als zwischen den Baumarten, wie durch die baumartenspezifischen Modelle angezeigt wird. Diese weisen signifikante Unterschiede in den Radialzuwachsreaktionen zwischen den getesteten Ereignisjahren nach (Abb. 7). Die Regressionskoeffizienten sind jeweils signifikant von Null, zwischen den Baumarten jedoch nicht signifikant verschieden. Während bei Buche im Jahr 1976 die stärksten und im Jahr 1947 die geringsten Zuwachseinbrüche zu verzeichnen sind, weisen die untersuchten Fichten die stärksten Zuwachseinbrüche im Jahr 2003 gefolgt vom Jahr 1947 auf.

#### 4.5 Höhenlagenabhängige Lufttemperatur- und Niederschlagsanomalien in den Jahren 1947, 1976 und 2003 im Gebiet des Südschwarzwaldes

Abbildung 8 stellt die mittleren vertikalen Lufttemperatur- (links) und Niederschlagsgradienten (rechts) in den Monaten Mai-Juni im Untersuchungsgebiet für die ausgewählten Ereignisjahre 1947, 1976 und 2003 im Vergleich zum Mittelwert der Periode 1864 bis 2006 dar.



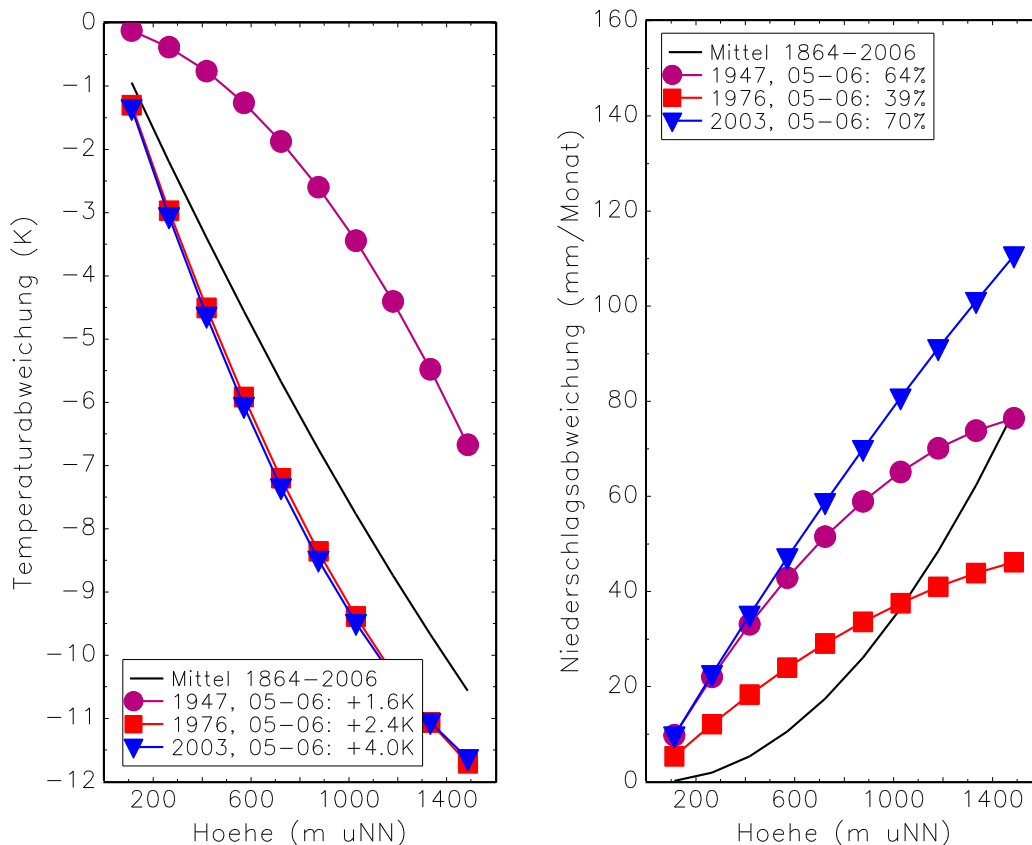


**Abb. 7:** Mit einem jeweils für Buche (FASY) und Fichte (PCAB) spezifizierten Dummy-Variablen Modell geschätzter Radialzuwachs in den Jahren  $t=1947, 1976$  und  $2003$  ( $ir_t$ ) in Abhängigkeit vom mittleren Radialzuwachs der 10-jährigen Vorperiode ( $ir_{t-10} - t-1$ ). Anzahl der Untersuchungsbäume Buche/Fichte: 1947:  $n=50/30$ ; 1976:  $n=50/30$ ; 2003:  $n=10/15$  (s. Tab. 1 und 2). Die Dummy-Variablen unterscheiden sich zwischen den Jahren (Buche:  $F(2,116)=9.995, p=0.000$ ; Fichte:  $F(2,84)=3.771, p=0.027$ ) und die Regressionskoeffizienten  $\beta_2$  sind in beiden Fällen signifikant von Null verschieden (Buche:  $t(116)=11.194, p=0.000$ ; Fichte:  $t(84)=8.875, p=0.000$ ).

Die mittlere Lufttemperatur in den Monaten Mai-Juni war im Untersuchungsgebiet im Jahr 1947 im Mittel um 1.6 K, 1976 um 2.4 K und 2003 um 4.0 K höher als im Mittel der Vergleichsperiode. Die Niederschlagsanomalien in den Monaten Mai-Juni betragen im Jahr 1947 im Mittel 64 %, 1976 39 % und 2003 70 % des vieljährigen Mittelwerts. Der mittlere vertikale Lufttemperatur-Gradient (Veränderung der mittleren monatlichen Lufttemperatur pro 100 Höhenmeter bezogen auf den Höhenbereich 200-1.000 m üNN) fiel im Mai-Juni der beiden Jahren 1976 und 2003 mit  $-0.95$  K/100 m deutlich geringer aus als im Vergleichszeitraum (1864-2006:  $-0.60$  K/100 m). In den Monaten Mai-Juni des Jahres 1947 waren die Hochlagen dagegen überproportional von dem überdurchschnittlichen Wärmeangebot in diesem Jahr betroffen (1976:  $-0.37$  K/100m). Der mittlere vertikale Niederschlagsgradient (Veränderung der mittleren monatlichen Niederschlagssumme pro 100 Höhenmeter, bezogen auf den Höhenbereich 200-1.000 m üNN) in den Monaten Mai-Juni beträgt im Untersuchungsgebiet im vieljährigen Mittel  $+34$  mm/100 m. Im Jahr 1976 war dieser geringfügig ( $+38$  mm/100 m), im Jahr 1947 mit  $+64$  mm/100 m deutlich, und im Jahr 2003 mit  $+78$  mm/100 m um mehr als das Doppelte erhöht.

## 5. Diskussion der Methodik

Sind die (zeitinvarianten) Koeffizienten der Gruppierungsvariablen,  $\beta_{i1}$ , in dem zu schätzenden Regressionsmodell korreliert mit den (zeitvariablen) Kovariablen  $x_{it}$ , würde die gewöhnliche Kleinst-Quadrat-Schätzung verzerrte und inkonsistente Ergebnissen liefern (vgl. Judge et al. 1988). Da dies bei den vorliegenden Daten der Fall ist, wurde für die Schätzung der Homogenität bzw. Heterogenität der Radialzuwachsreaktionen ein kombiniertes Zeitreihen-/Querschnittsdaten-Regressionmodell mit variablen  $y$ -Achsenabschnitten zugrunde gelegt.



**Abb. 8:** Mittlere Lufttemperatur- (links) und Niederschlagsabweichung (rechts) in den Monaten Mai-Juni in Abhängigkeit von der Meereshöhe im Untersuchungsgebiet Südschwarzwald.

Die Erweiterung zu einem Modell in dem nicht nur die  $y$ -Achsenabschnitte sondern auch die  $\beta_2$ -Steigungskoeffizienten als variabel zwischen den Gruppen angenommen werden wäre wünschenswert, scheitert im vorliegenden Fall jedoch an der, im Vergleich zur großen Anzahl der zu schätzenden Parameter ( $n=1+2k+2$ ), geringen Anzahl an Beobachtungen ( $n=5$  je Plot).

## 6. Zusammenfassung

Die Untersuchung der Radialzuwachsreaktionen in den Jahren 1947, 1976 und 2003 auf der Basis eines kombinierten Zeitreihen-Querschnitts-Modells hat folgendes ergeben:

- Die Radialzuwachsreaktionen im Jahr 2003 der untersuchten Fichten von der kollinen, submontanen und montanen Höhenstufe unterscheiden sich (Abb. 5 links): Der Zuwachseinbruch ist am größten in der submontanen, am geringsten in der montanen Höhenstufe.
- Die Radialzuwachsreaktionen im Jahr 2003 der untersuchten Fichten von Sommer- und Winterhängen (jeweils kollin, submontan, montan) unterscheiden sich nicht (Abb. 5 rechts).
- Es konnte kein Unterschied in den Radialzuwachsreaktionen des Jahres 2003 zwischen vorherrschenden und beherrschten Buchen in submontaner Höhenlage nachgewiesen werden.
- In der montanen Höhenlage am Winterhang war der Zuwachseinbruch im Jahr 2003 der untersuchten Fichten signifikant größer als der der untersuchten Buchen (Abb. 6 links).
- Es besteht kein gesicherter Unterschied in den Radialzuwachsreaktionen des Jahres 2003 zwischen den untersuchten Buchen und Douglasien in submontaner Höhenlage (Abb. 6 rechts).
- Die Zuwachsreaktionen der untersuchten Buchen und die der untersuchten Fichten weisen signifikante Unterschiede zwischen den Jahren 1947, 1976 und 2003 auf. Zuwachseinbruch bei Buche: 1976 > 2003 > 1947; bei Fichte: 2003 > 1947 > 1976 (Abb. 7).

Die klimastatistische Auswertung hat folgendes ergeben:

- Die mittlere Lufttemperatur in den Monaten Mai-Juni war im Untersuchungsgebiet im Jahr 1947 im Mittel um 1.6 K, 1976 um 2.4 K und 2003 um 4.0 K höher als im Mittel 1864-2006.

- Die Niederschlagsanomalien in den Monaten Mai-Juni betragen im Jahr 1947 im Mittel 64 %, 1976 39 % und 2003 70 % des vieljährigen Mittelwerts.
- Der vertikale Lufttemperaturgradient in den Monaten Mai-Juni war im Jahr 1947 mit  $-0.37$  K/100 m deutlich größer als im vieljährigen Mittel (Abb. 8 links).
- Der vertikale Niederschlagsgradient in den Monaten Mai-Juni war im Jahr 2003 mit  $+78$  mm/100 m mehr als doppelt so groß wie im vieljährigen Mittel (Abb. 8 rechts).

## 7. Literatur

- Arbeitskreis KLIWA (LUBW, BLfU, DWD) 2006. Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland: Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. KLIWA-Berichte 9, 100 S.
- Becker, M., Landmann, G., Levy, G., 1989. Silver fir decline in the Vosges Mountains (France): Role of climate and silviculture. *Water, Air, and Soil Pollution* 48, 77-86.
- Bosch, C., Pfannkuch, E., Baum, U., Rehfuess, K.E., 1983. Über die Erkrankung der Fichte (*Picea abies* Karst.) in den Hochlagen des Bayerischen Waldes. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 102, 167-181.
- Cramer, H.H., Cramer-Middendorf, M., 1984. Untersuchungen über Zusammenhänge zwischen Schadensperioden und Klimafaktoren in mitteleuropäischen Forsten seit 1851. *Pflanzenschutz-Nachrichten Bayer* 37, 208-334.
- Eichkorn, T., 1986. Wachstumsanalysen an Fichten in Südwestdeutschland. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 157, 125-139.
- Hausman, J.A., 1978. Specification tests in econometrics. *Econometrica* 46: 1251-1271.
- Jolly, W.M., Dobbertin, M., Zimmermann, N.E., Reichstein, M., 2005. Divergent vegetation growth responses to the 2003 heat wave in the Swiss Alps. *Geophysical Research Letters* 32, doi:10.1029/2005GL023252.
- Judge, G.C., Hill, R.C., Griffiths, W.E., Lütkepohl, H., Lee, T.C., 1988. *Introduction to the Theory and Practice of Econometrics*. John Wiley and Sons, New York, 1024 S.
- Kahle, H.P., 2006. Impact of the drought in 2003 on intra- and inter-annual stem radial growth of beech and spruce along an altitudinal gradient in the Black Forest, Germany. *TRACE - Tree rings in Archaeology, Climatology and Ecology*. Forschungszentrum Jülich, 151-163.
- Kahle, H.P., Spiecker, H., 1996. Adaptability of radial growth of Norway spruce to climate variations: results of a site specific dendroecological study in high elevations of the Black Forest (Germany). *Radiocarbon*, 785-801.
- Kirchner, M., Mössmer, R., Reuther, M., 1992. Vertikale Verteilung der Waldschäden in den Alpen. *AFZ* 47, 1283-1287.
- Lorenz, M., Becher, G., Mues, V., Fischer, R., Ulrich, E., Dobbertin, M., Stofer, S., 2004. *Forest Condition in Europe - 2004*. Technical Report. United Nations Economic Commission for Europe (UN/ECE) and European Commission (EC). Geneva, Brussels, 96 S.
- Mössmer, R., 1986. Verteilung der neuartigen Waldschäden an der Fichte nach Bestandes- und Standortmerkmalen in den Bayerischen Alpen - Eine Untersuchung auf der Grundlage von Infrarot-Farbluftbildern. *Forstliche Forschungsberichte München* 73, 144 S.
- Parlow, E., Scherer, D., Fehrenbach, U., 2006. Regionale Klimaanalyse Südlicher Oberrhein (REKLISO) - Abschlussbericht. Regionalverband Südlicher Oberrhein, Freiburg, 98 S.
- Picard, J.F., 1995. Changes in the radial growth of beech (*Fagus sylvatica* L.) in the Vosges. Preliminary results from the Lorraine catchment area. *Annales des Sciences Forestieres* 52, 11-21.
- Prinz, B., 1987. Causes of forest damage in Europe: Major hypotheses and factors. *Environment* 29, 11-15, 32-37.
- Schindler, D., Mayer, H., 2007. Forstmeteorologische Untersuchungen zur Trockenheit 2003 im Südwesten Deutschlands. Unveröffentlichtes Manuskript, 49 S.
- Schönwiese, C.D., 1992. *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*. Gebr. Borntraeger, Berlin, 2., verb. Aufl., 231 S.
- Spiecker, H., 1991. Growth variation and environmental stresses: Long-term observations on permanent research plots in Southwestern Germany. *Water, Air, and Soil Pollution* 54, 247-256.
- Stock, M. (Hrsg.), 2005. *KLARA: Klimawandel - Auswirkungen, Risiken, Anpassung*. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung. PIK-Report 99, 199 S.
- Zöttl, H.W., Mies, E., 1983. Nährelementversorgung und Schadstoffbelastung im Gebiet des Bärhaldegranits (südlicher Hochschwarzwald). *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 148, 185-197