

**Projekt Europäisches Forschungszentrum
für Maßnahmen zur Reinhaltung der Luft
Forschungsbericht KfK - PEF**

Projekt:

**Zusammenhänge zwischen der Variation von Klima und
Witterung und inter- und intraannuellen
Wachstumsreaktionen von Fichten, Tannen, Buchen und
Eichen auf ausgewählten Standorten des Schwarzwalds**

Zuwendungs-Nr. PEF 1 94 002

August 1998

Hans-Peter Kahle, Heinrich Spiecker, Young-In Park

Institut für Waldwachstum, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Zusammenhänge zwischen der Variation von Klima und Witterung und inter- und intraannuellen Wachstumsreaktionen von Fichten, Tannen, Buchen und Eichen auf ausgewählten Standorten des Schwarzwalds

Hans-Peter Kahle, Heinrich Spiecker, Young-In Park

Institut für Waldwachstum, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Zusammenfassung:

Das Ziel des hier vorgestellten waldwachstumskundlichen Forschungsvorhabens besteht in der Untersuchung der Zusammenhänge zwischen der Variation von Klima und Witterung und den inter- und intraannuellen Zuwachsreaktionen von Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.), Tannen (*Abies alba* Mill.), Buchen (*Fagus sylvatica* L.) und Eichen (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. und *Quercus robur* L.) unter besonderer Berücksichtigung ausgewählter Standortfaktoren.

Im Flächenschwarzwald wurden hierzu Fichten und Tannen entlang eines Gradienten zunehmender temporärer Vernässung auf einem mäßig frischen, einem wechselfeuchten und einem vernässenden Standort ausgewählt. Im Gebiet des Südschwarzwalds und der Oberrheinischen Tiefebene wurden Untersuchungsbäume entlang von Talquerschnitten in den Höhenstufen kollin bis montan auf Sommer- und Winterhängen an Standorten ausgewählt, die sich im Hinblick auf das Wasserspeichervermögen und die Nährstoffausstattung des Bodensubstrats wenig unterscheiden.

Die Witterungsverhältnisse in verschiedenen Höhenlagen des Schwarzwaldes und Oberrheinischen Tieflands unterliegen großen periodischen Schwankungen, die enge Zusammenhänge mit den Wachstumsreaktionen der Bäume aufweisen. Damit kommt dem Witterungsverlauf eine Schlüsselrolle bei der Steuerung kurz- und mittelfristiger Wachstumsabläufe zu. Besonders bemerkenswert ist die mehrere Jahre anhaltende wachstumshemmende Wirkung warmtrockener Sommer und die wachstumssteigernde Wirkung feuchtkühler Sommer. Der Standortfaktor Höhenlage wirkt sich stärker differenzierend auf die Wachstumsreaktionen der untersuchten Waldbäume aus, als der Faktor Exposition.

Summary:

Inter- and intraannual growth responses of Norway spruce, silver fir, European beech and oak on selected sites in the Black Forest, Germany

In this research report inter- and intraannual growth responses of Norway spruce, silver fir, European beech and oak are investigated with special regard to selected site factors. In the central Black Forest Norway spruce and silver fir have been sampled along a gradient of increasing amount of impeded soil water. In the southern Black Forest all four species have been sampled on similar sites related to soil moisture storing capacity and soil nutrition along elevational line transects including two different site aspects.

Climate varies considerably and climate oscillations are different between elevations. Interannual climate growth models are developed using time varying formulations. High potential evapotranspiration during April to June of preceding years has a significant negative impact on radial growth of Norway spruce on all sites regardless of elevation and aspect. Not only in the viticultural climate of the Kaiserstuhl, but also in the high elevation sites, variations in climatic water balance of preceding years are directly linked to tree-ring width.

Cell diameter of spruces from high elevation sites is larger than that from low elevation sites, whereas wall thickness of late wood cells is significantly smaller at the higher elevation. Deviations of different cell parameters from their long-term means in the year 1976 are explained by drought effects.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung und Zielsetzung	1
2.	Material und Methodik	2
2.1	Datenerhebung.....	2
2.2	Analysemethoden.....	3
2.3	Untersuchungsstandorte und Untersuchungsbäume.....	3
2.4	Klimadaten.....	10
3.	Ergebnisse	11
3.1	Verlauf von Klima und Witterung in den Untersuchungsgebieten.....	11
3.2	Analyse der interannuellen Wachstumsreaktionen.....	20
3.2.1	Vergleich der Radialzuwachsreaktionen von Fichten, Tannen, Buchen und Eichen auf ausgewählten Standorten des Schwarzwalds und der Oberrheinischen Tiefebene.....	20
3.2.2	Vergleich des Höhenwachstums von Fichten und Tannen auf ausgewählten Standorten des Südschwarzwalds und der Oberrheinischen Tiefebene.....	32
3.2.3	Vergleich der interannuellen Wachstumsreaktionen von Fichten und Tannen auf einer mäßig frischen, einer wechselfeuchten und einer vernässenden Standortseinheit im Oberen Buntsandstein des Flächenschwarzwalds.....	35
3.2.4	Zusammenhänge zwischen der Variation von Klima und Witterung und den interannuellen Radialzuwachsreaktionen von Fichten auf ausgewählten Standorten des Südschwarzwalds und der Oberrheinischen Tiefebene.....	38
3.3	Zellstrukturanalyse.....	41
3.3.1	Interannuelle Analyse.....	41
3.3.2	Intraannuelle Analyse.....	44
3.3.3	Zusammenhänge zwischen Klima und Zellparametern.....	45
4.	Diskussion	47
4.1	Diskussion des Untersuchungsmaterials.....	47
4.2	Diskussion von Forschungsansatz und Untersuchungsmethoden.....	48
4.3	Diskussion der Untersuchungsergebnisse.....	49
5.	Zusammenfassung.....	52
6.	Literaturverzeichnis	54
7.	Anhang.....	58

1. Einleitung und Zielsetzung

Das Ziel des hier vorgestellten waldwachstumskundlichen Forschungsvorhabens besteht in der Untersuchung der Zusammenhänge zwischen der Variation von Klima und Witterung und den inter- und intraannuellen Zuwachsreaktionen von Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.), Tannen (*Abies alba* Mill.), Buchen (*Fagus sylvatica* L.) und Eichen (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. und *Quercus robur* L.) unter besonderer Berücksichtigung ausgewählter Standortfaktoren. Im Flächenschwarzwald wurden hierzu Fichten und Tannen entlang eines Gradienten zunehmender temporärer Vernässung auf einem mäßig frischen, einem wechselfeuchten und einem vernässenden Standort ausgewählt. Im Gebiet des Südschwarzwalds und der Oberrheinischen Tiefebene wurden Untersuchungsbäume entlang von Talquerschnitten in den Höhenstufen kollin bis montan auf Sommer- und Winterhängen an Standorten ausgewählt, die sich im Hinblick auf das Wasserspeichervermögen und die Nährstoffausstattung des Bodensubstrats wenig unterscheiden.

Die Standortfaktoren 'Höhenlage und Exposition' kennzeichnen zwei miteinander gekoppelte klimatologische Wirkungskomplexe. Wichtige wachstumsrelevante Klimaparameter deren Ausprägungen eng mit der Höhenlage und Exposition in Zusammenhang stehen sind:

- die Niederschläge nach dem Betrag der Niederschlagssummen, sowie nach Niederschlagsarten und -häufigkeiten
- die Lufttemperaturen nach dem Betrag der Mitteltemperaturen sowie der Maximal- und Minimalwerte
- die Einstrahlungsverhältnisse nach Strahlungsarten und -intensitäten
- der Nebel nach Nebelhäufigkeit und -intensität
- der Wind nach Windhäufigkeit, -stärke und -richtung.

In den Mittelgebirgen nehmen die Niederschläge im allgemeinen mit der Meereshöhe zu, die Lufttemperaturen ab (BARRY 1992). Wegen verminderter Absorption der direkten Sonnenstrahlung nimmt die Strahlungsintensität mit der Höhenlage zu (BAUMGARTNER 1960, TURNER 1961, MARGL 1971, BIEDERBICK, 1992). In Mittelgebirgslagen ergibt sich eine vertikale Zonierung der Nebelhäufigkeit in eine Talnebelzone, nebelarme Hangzone und eine nebelreiche Hochlagenzone (BAUMGARTNER 1958). Markante Phänomene des Gebirgsklimas sind außerdem Föhn sowie Berg- und Talwindzirkulationen. Dabei tritt Wind in den Hochlagen als trockenstreßverschärfender und eine große Wechselhaftigkeit bedingender Faktor in Erscheinung.

Diese Zusammenhänge beruhen vor allem auf konvektiven und reliefabhängigen (orographischen) Mechanismen. Die sich jeweils ergebenden vertikalen Gradienten sind jedoch weder räumlich noch zeitlich konstant und gleichgerichtet. So ist z.B. bei den am Schwarzwaldwestrand häufigen winterlichen Inversionswetterlagen der vertikale Lufttemperaturgradient positiv (vgl. HAVLIK 1970). Die begünstigten 'warmen Hanglagen' befinden sich außerhalb des Bereichs orographisch ausgebildeter Kaltluftseen und sind somit bei größerer Höhenlage weniger frostgefährdet als tiefergelegene Vergleichsstandorte.

Die hier angedeuteten Zusammenhänge zwischen Relief und wachstumsrelevanten Klimaparametern lassen vermuten, daß sich diese auch in den klimabedingten Zuwachsreaktionen der Waldbäume widerspiegeln. In bezug auf das Waldwachstum in Abhängigkeit von Höhenlage und Exposition gibt

es in der Literatur jedoch zum Teil widersprüchliche Befunde, Aussagen und Interpretationen. Damit wird deutlich, daß selbst bei Einbeziehung der Ergebnisse zahlreicher bereits durchgeführter Untersuchungen zu dem angesprochenen Themenkomplex Fragen offenbleiben von denen einige in dem hier vorgestellten Vorhaben untersucht werden sollen.

Anhand der jährlichen Radialzuwächse kann das Dickenwachstum und anhand der jährlichen Höhenzuwächse das Höhenwachstum von Bäumen jahrgenau retrospektiv analysiert werden. Werden Untersuchungsbäume auf unterschiedlichen Standorten ausgewählt, können die Auswirkungen wachstumsbeeinflussender Umweltfaktoren in der Vergangenheit auf standörtlicher Grundlage untersucht, und Zusammenhänge zwischen den Variationen von Klima und Witterung und den interannuellen Wachstumsveränderungen mit statistischen Methoden quantitativ beschrieben werden.

Die Untersuchung intraannueller Wachstumsreaktionen von Fichten erfolgt auf der Ebene der Zellen auf Stammquerschnittflächen. In Abhängigkeit von sich ändernden Umweltbedingungen variieren die Zellstrukturen innerhalb der Jahrringe, und Informationen über die vor und während des Teilungs- und Ausdifferenzierungsprozesses der Zellen wirksamen Umwelteinflüsse werden in den Jahrringen gespeichert (LARSON 1973, MERKEL 1984, WILPERT 1990). Diese intraannuellen strukturellen Variationen, in denen Informationen über die jeweiligen Wachstumsbedingungen des Baumes enthalten sind, werden anhand von Merkmalen der einzelnen Zellen im Jahrring quantifiziert.

Die für mitteleuropäische Verhältnisse extremen Unterschiede in den klimatischen Bedingungen zwischen den Hochlagen des Südschwarzwalds und den kollinen Lagen im Weinbauklima des Kaiserstuhls stellen eine kontrastreiche naturräumliche Kulisse dar, um das Wachstum und die Wachstumsreaktionen von Fichten, Tannen, Buchen und Eichen in einem einheitlichen regional-klimatischen Raum, aber unter, vom Niveau her, unterschiedlichsten klimatischen Bedingungen miteinander zu vergleichen.

Bei einer horizontalen Entfernung zwischen Kaiserstuhl und Feldberg von nur ca. 30 Kilometern beträgt der Höhenunterschied beinahe 1300 Meter. Einem Jahresmittel der Lufttemperatur von 4.0°C und jährlichen Niederschlagssummen von 1850 mm auf dem Feldberg stehen im vieljährigen Mittel 10.1°C und 890 mm im Kaiserstuhl gegenüber (Bezugszeitraum 1961-1990). Durch den Vergleich des Wachstums von Untersuchungsbäumen auf standörtlichen Extremvarianten und durch die kombinierte inter- und intraannuelle Analyse von Jahrringmerkmalen sollen das Verständnis für die Zusammenhänge zwischen Klima bzw. Witterung und dem Waldwachstum vertieft, und damit die Prognosemöglichkeiten des Wachstums unter sich verändernden Umweltbedingungen verbessert werden.

2. Material und Methodik

2.1 Datenerhebung

Für die Untersuchung wurden vorherrschende und herrschende, großkronige Bestandesbäume ohne äußerlich erkennbare Schäden (z.B. Rindenverletzungen durch Holzernteschäden, Stammfäule, Kronenbrüche), jedoch ohne Berücksichtigung von Kronenverlichtung, nach einem Zufallsverfahren ausgewählt. Bei der Untersuchungsbaumauswahl wurde gezielt auch auf das Vorhandensein von

starken Totästen im unteren Schaftbereich, als Hinweis auf die vorherrschende/herrschende soziale Stellung des Baumes in der Jugendentwicklungsphase, geachtet. Von den gefälltten Untersuchungsbäumen wurden Stammscheiben aus 1.3 m Schafthöhe entnommen und an den Fichten und Tannen wurden zusätzlich Höhenanalysen am liegenden Stamm durchgeführt. Für die Analyse der Zellstrukturen wurden die Stammquerschnittsflächen (aus 1.3 m Schafthöhe) ausgewählter Bäume mit einer Ultrapräzisionsfräse bearbeitet. Zur Radialzuwachs- und Zellstrukturvermessung wurden die Holzproben streifenweise abgescannt und die digitalisierten Bilder rechnergestützt mit einem interaktiven Bildanalysesystem ausgewertet. Auf den geschliffenen Stammscheiben wurden entlang von acht nach Himmelsrichtung orientierten Radien (Abstand 45°) die jährlichen Radialzuwächse vermessen. Der in der Untersuchung verwendete mittlere jährliche Radialzuwachs wurde mit einem robusten Mittelwertschätzer (biweight mean) aus den acht Einzelwerten berechnet.

Die verwendeten Klimadaten wurden vom Deutschen Wetterdienst zur Verfügung gestellt.

2.2 Analysemethoden

Die Qualitätskontrolle der Radialzuwachsvermessung erfolgte anhand eines kombinierten graphisch-visuellen und quantitativen Verfahrens. Für die quantitative Überprüfung der Datierung wurde die COFECHA-Software (ITRDB 1996) angewendet. Das methodische Vorgehen bei der Analyse der Radialzuwachsreihen, der Aufbereitung und Analyse der meteorologischen Meßreihen (Überprüfung der Homogenität, Homogenisierung, Berechnung von Klimaindexwerten, räumliche Interpolation) und der zeitvariablen Modellierung der Zusammenhänge zwischen Dickenwachstum und Umwelteinflüssen ist in KAHLE (1994) und KAHLE & SPIECKER (1996) beschrieben. Zur multivariaten Analyse der Zellstrukturdaten wurden varianzanalytische Methoden angewendet. Die statistischen Auswertungen erfolgten mit den GAUSS (APTECH 1994) und SAS (SAS-INSTITUTE 1991) Software-Paketen.

2.3 Untersuchungsstandorte und Untersuchungsbäume

Entsprechend der Untersuchungskonzeption wurden im Gebiet des Südschwarzwalds (Wuchsgebiet 3: Schwarzwald und Wuchsgebiet 1: Oberrheinisches Tiefland) Untersuchungsbäume auf Standorten entlang eines Höhengradienten auf SW-exponierten Sommer- und NE-exponierten Winterhängen, und im Flächenschwarzwald auf Standorten entlang eines Gradienten zunehmender temporärer Vernässung ausgewählt. Eine detaillierte Beschreibung der Standorteinheiten von denen die Untersuchungsbäume stammen ist im Anhang enthalten (Anhang 1).

Die Auswahl der Untersuchungsstandorte erfolgte in enger Zusammenarbeit mit der Abteilung Botanik und Standortkunde der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg¹.

Tabelle 2-3-1 enthält allgemeine Angaben zu den Standorten der in diesem Bericht analysierten Untersuchungsbäume. Je Untersuchungsstandort und Baumart wurden i.d.R. fünf Untersuchungs-

¹ Herrn Forstdirektor Dr. Aldinger, und den Forsträten Hr. Schreiner, Hr. Jacob und Hr. Mann sei für die Unterstützung bei der Auswahl der Standorte und bei der standortkundlichen Feinkartierung an dieser Stelle gedankt.

bäume ausgewählt². Im Höhenlagenbereich zwischen 260 m üNN und 1330 m üNN wurden insgesamt 164 Bäume, davon 49 Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.), 45 Tannen (*Abies alba* Mill.), 50 Buchen (*Fagus sylvatica* L.), und 20 Eichen (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. und *Quercus robur* L.) untersucht (Tabelle 2-3-1).

Im Südschwarzwald wurden von der kollinen Höhenstufe bis zur aktuellen alpinen Waldgrenze in der hochmontanen Höhenstufe, jeweils die Standortvarianten Sommerhang und Winterhang beprobt. Die Untersuchungsstandorte liegen an stark geneigten bis steilen Mittelhanglagen und gehören überwiegend der Ökoserie der lehmigen Grushänge an (Tab. 2-3-3 und 2-3-4). Die maximale horizontale Entfernung zwischen den Untersuchungsstandorten beträgt 34 km (HW1 und KK3).

Die Untersuchungsstandorte im Kaiserstuhl (Oberrheinisches Tiefland) befinden sich in schwach (KK3) und stark geneigten Hanglagen und gehören den Ökoserien der Lößhänge und Vulkanit-lehmhänge der Zonalgesellschaft der kollinen Laubmischwälder an (Tab. 2-3-3 und 2-3-4).

Nicht auf allen Standortvarianten konnten alle Untersuchungsbaumarten gefunden werden. So waren in der submontanen Höhenstufe auf den ausgewählten Standorten keine geeigneten Fichten-Untersuchungsbäume zu finden. In der hochmontanen Höhenstufe konnten keine den Auswahlkriterien entsprechende Tannen, und oberhalb der submontanen Höhenstufe keine geeigneten Eichen gefunden werden (vgl. Tab. 2-3-2).

Im Flächenschwarzwald wurden auf einer Plateaulage des Oberen Buntsandsteins, innerhalb ein und desselben Bestandes, Fichten und Tannen auf einem nicht vernässenden (MF), einem wechselfeuchten (WF) und einem vernässenden Standort ausgewählt (Tab. 2-3-3 und 2-3-4). Die Untersuchungsstandorte liegen maximal ca. 500 m voneinander entfernt.

Für die Zellstrukturanalyse wurden Fichten aus dem Kaiserstuhl (Fi-KK3) sowie aus den Hochlagen des Südschwarzwalds, aus der Kontrollfläche des ARINUS Versuchsgebiets Schluchsee, verwendet. Die Untersuchungsbäume aus den ARINUS Versuchflächen sind in MÄKINEN (1997) detailliert beschrieben.

Waldwachstumskundliche Kenngrößen der Untersuchungsbaumkollektive sind in Tabelle 2-3-5 wiedergegeben. Über alle untersuchten Baumarten hinweg schwankt das Alter der Untersuchungsbäume zwischen 62 Jahren (Fi-KK3) und 291 Jahren (Ei-SS3). Innerhalb der einzelnen Baumarten sind die Altersunterschiede wesentlich geringer. Die höchste Fichte war 43.3 m hoch und ist auf einem Winterhang im Fbz. Müllheim in einer Meereshöhe von 390 m üNN (kollin) erwachsen (Fi-KW2). In demselben Bestand ist auch die mit 42.0 m höchste untersuchte Tanne erwachsen (Ta-

² Den Leitern der Staatlichen Forstämter Todtnau, Müllheim, Staufen, St. Märgen, Breisach und Sankt Blasien, den örtlich zuständigen Revierbeamten sowie den Forstwirten die bei den Außenarbeiten mitgewirkt haben, sei an dieser Stelle für die Unterstützung gedankt.

KW2). In der submontanen Höhenstufe, ebenfalls auf einem Winterhang, wurde mit einer Höhe von 41.0 m die höchste untersuchte Buche gemessen (Bu-SW1).

Der Dickenwachstumsgang der Waldbäume ist sehr stark von den jeweils in der Vergangenheit herrschenden Standraumverhältnissen abhängig. Der dickste untersuchte Baum war eine Fichte mit einem Brusthöhendurchmesser von 78.0 cm mit Rinde (Fi-MW1).

Tabelle 2-3-1: Übersicht über die Untersuchungsstandorte.

ID	Variante	Waldort		Höhenlage ü.N.N. m	Hang- richtung
		Forstbezirk	Name		
HS1	<u>H</u> ochmontan <u>S</u> ommerhang		Feldberg/ Feldberghalde	1330	SW
HW1	<u>H</u> ochmontan <u>W</u> interhang	Todtnau	Silberberg	1320	NE
MS1	<u>M</u> ontan <u>S</u> ommerhang		Sirnitzerwald/ Schnelling	930	SW
MW1	<u>M</u> ontan <u>W</u> interhang	Müllheim	Sirnitzerwald/ Sirnitzgraben	940	NE
SS1			Prälatenwald/ Dietzelbacher Höhe	720	SW
SS2		Staufen	Prälatenwald/ Rödelsburg	690	SW
SS3	<u>S</u> ubmontan <u>S</u> ommerhang		Spirzen	650	SW
SW1	<u>S</u> ubmontan <u>W</u> interhang	St. Märgen	Spirzen	830	NE
KS1			Prälatenwald/ Salzbrunnen	490	SW
KS2	<u>K</u> ollin <u>S</u> ommerhang		Prälatenwald/ Breitmattenköpfe	460	SW
KW1		Staufen	Eschwald/ Alter Eschwald	450	NE
KW2	<u>K</u> ollin <u>W</u> interhang	Müllheim	Bubenberg/ Vorderer Bubenberg	390	NE
KK1			Kaiserstuhl/ Bruderhäusle Dobel	460	NE
KK2			Kaiserstuhl/ Fuchsbuck	420	SW
KK3	<u>K</u> ollin <u>K</u> aiserstuhl	Breisach	Kaiserstuhl/ Ameisenbuck	260	SE

ID	Variante	Waldort		Höhenlage ü.N.N. m	Hang- richtung
		Forstbezirk	Name		
MF	<u>M</u> äßig <u>F</u> risch		Kälbling/ Wulzenschlägle	685	S
WF	<u>W</u> echselfeucht		Kälbling/ Wulzenschlägle	685	S
VN	<u>V</u> er <u>n</u> ässend	Bad Lieben- zell	Kälbling/ Grünmoos	685	-

Tabelle 2-3-2: Untersuchungsstandorte und Verteilung der Untersuchungsbäume.

ID	Waldort		Anzahl Untersuchungsbäume				Summe
	Forstbezirk	Distr./Abt.	Fichte	Tanne	Buche	Eiche	
HS1		IV/25	5	-	5	-	10
HW1	Todtnau	V/10	5	-	5	-	10
MS1		I/17	5	5	5	-	15
MW1	Müllheim	I/1 u. 2	5	5	5	-	15
SS1		VI/6	-	5	-	-	5
SS2	Staufen	VI/13	-	-	5	5	10
SS3		I/6	-	-	5	5	10
SW1	St. Märgen	I/22	-	-	5	-	5
KS1		VI/17	4	-	-	-	4
KS2		VI/8	-	5	5	5	15
KW1	Staufen	III/1	-	-	5	-	5
KW2	Müllheim	XII/1	5	5	-	-	10
KK1		I/1	-	5	-	-	5
KK2		I/3	-	-	-	5	5
KK3	Breisach	II/13	5	-	5	-	10
MF		XXV/15	5	5	-	-	10
WF		XXV/15	5	5	-	-	10
VN	Bad Liebenzell	XXV/6	5	5	-	-	10

ID	Waldort		Anzahl Untersuchungsbäume				
	Forstbezirk	Distr./Abt.	Fichte	Tanne	Buche	Eiche	Summe
		Gesamt	49	45	50	20	164

Tabelle 2-3-3: Lagebeschreibung der Untersuchungsstandorte.

ID	Höhenlage üNN	Örtliche Lage	Hang- richtung	Hangnei- gung	Rechtswert	Hochwert
	Min-Max/Mittel, m			%	m	m
HS1	1330	Mittelhang	SW	50	3426870	5302880
HW1	1320	Mittelhang	NE	55	3425130	5300050
MS1	930-940/930	Mittelhang	SW	25	3406480	5296630
MW1	930-960/940	Mittelhang	NE	50	3406560	5296250
SS1	700-730/720	Mittelhang	SW	45	3408200	5304830
SS2	650-720/690	Mittelhang	SW	45	3408930	5304900
SS3	600-770/650	Mittelhang	SW	45	3429150	5315550
SW1	800-850/830	Mittelhang	NE	20	3429050	5323200
KS1	490-500/490	Mittelhang	SW	42	3409130	5303650
KS2	440-490/460	Mittelhang	SW	34	3408100	5303450
KW1	450	Mittelhang	NE	48	3405180	5303280
KW2	380-410/390	Mittelhang	NE	43	3403000	5300930
KK1	460	Mittelhang	NE	28	3403130	5329050
KK2	370-390/380	Oberhang	SW	21	3403180	5328450
KK3	260-280/270	Unterhang	SE	2	3401330	5325800
MF	685	Plateau	S	2		
WF	685	Plateau	S	2		
VN	685	Plateau	-	0		

Tabelle 2-3-4: Standortkundliche Charakterisierung der Untersuchungsstandorte*.

ID	Regionale Gliederung		Lokale Gliederung		
	Wuchsbezirk	Regional/-Zonalgesellschaft	Ökoserie	Standorteinheit	
HS1		Hochmontaner Bergmischwald mit Buche, Bergahorn, Tanne und wenig Fichte	ÖS ** der lehmigen Hochlagenhänge; Sommerhänge	Lehmiger Hochlagen-Sommerhang	
HW1	TB 3/10-W+S [‡]		ÖS der lehmigen Hochlagenhänge; Winterhänge	Lehmiger Hochlagen-Winterhang	
MS1		Montaner Buchen-Tannen-Wald	ÖS der lehmigen Grushänge; Sommerhänge	Mäßig frischer lehmig-grusiger Sommerhang	
MW1	TB 3/10-W+S		ÖS der Lehmhänge; Winterhänge	Mäßig frischer lehmiger Winterhang	
SS1		Atlantisch submontaner Buchen-Eichen-Tannen-Wald	ÖS der lehmigen Grushänge; Sommerhänge	Mäßig frischer lehmig-grusiger Sommerhang	
SS2	TB 3/10-W+S		ÖS der lehmigen Steinschutthänge; Sommerhänge	Mäßig frischer lehmiger Steinschuttsommerhang	
SS3			ÖS der lehmigen Steinschutthänge; Sommerhänge	Saurer, mäßig trockener Steinschutt-Sommerhang bis trockener Block- und Felshang	
SW1	EWB 3/09		ÖS der Lehmhänge; Winterhänge	Mäßig frischer lehmiger Winterhang	
KS1		Atlantisch-kolliner Laubmischwald, meist buchenreich		Mäßig trockener lehmig-grusiger Sommerhang	
KS2					
KW1					Buchenwald auf mäßig frischem lehmigen Grushang
KW2	TB 3/10-W+S		ÖS der lehmigen Grushänge		
KK1		Kolliner Laubmischwald (meist buchenreich)		Buchen-Eichen-Wald auf mäßig frischem Vulkanitlehmhang	
KK2			ÖS der Vulkanitlehmhänge	Buchen-Eichen-Wald auf mäßig trockenem Vulkanitlehmhang	
KK3	EWB 1/07		ÖS der Lößhänge	Buchenwald auf mäßig frischem Lößhang	
MF		Submontaner Buchen-Tannen-Wald mit Eiche	ÖS der nicht vernässenden lehmigen Sande	Stark saurer mäßig frischer lehmiger Sand	
WF			ÖS der mehr oder weniger vernässenden lehmig-sandigen Böden	Stark saurer wechselfeuchter lehmig-sandiger Boden	
VN	TB 3/06a		Missen, vermoorte Lagen und Moorstandorte	Nasse bzw. wasserzügige Misse	

* Standortkundliche Charakterisierung nach dem Baden-Württembergischen standortkundlichen Verfahren.

** ÖS: Ökoserie

‡ EWB: Einzelwuchsbezirk, TB: Teilbezirk, Wuchsgebiet 1: Oberrheinisches Tiefland, Wuchsgebiet 3: Schwarzwald.

Tabelle 2-3-5: Waldwachstumskundliche Kenngrößen der Untersuchungsbaumkollektive.

ID	Alter *			Baumhöhe *			Durchmesser d _{1,3m.R.} *		
	min	max	mean	min	max	mean	min	max	mean
		a			m			cm	
Fi-HS1	123	146	132.6	25.1	27.4	26.0	46.7	48.5	47.5
Fi-HW1	109	126	120.8	24.5	30.8	27.7	48.1	52.7	50.4
Fi-MS1	122	153	145.6	31.2	37.1	34.2	39.6	66.5	55.5
Fi-MW1	118	128	121.6	34.7	38.3	36.4	54.5	78.0	62.8
Fi-KS1	114	115	114.5	27.5	34.8	31.5	39.4	54.2	44.0
Fi-KW2	80	107	95.0	39.6	43.3	40.8	41.5	64.9	52.5
Fi-KK3	62	94	83,6	31,9	36,4	33,9	24,9	61,1	49,5
Ta-MS1	144	152	147.6	29.1	31.2	29.9	57.7	67.3	63.9
Ta-MW1	121	153	136.2	29.6	34.3	32.1	62.9	72.4	67.7
Ta-SS1	126	151	137.8	-	-	-	-	-	-
Ta-KS2	93	133	119.0	29.7	33.4	32.3	53.5	65.0	59.4
Ta-KW2	86	100	94.2	38.7	42.0	40.0	52.1	63.8	57.5
Ta-KK1	69	70	69,4	27,3	31,5	29,8	41,2	48,3	44,3
Bu-HS1	121	157	141.4	18.3	19.2	18.8	35.0	41.6	37.4
Bu-HW1	146	176	161.6	20.2	23.8	22.2	31.6	46.1	37.9
Bu-MS1	158	174	162.8	27.0	32.1	29.2	48.5	54.1	52.1
Bu-MW1	159	170	164.6	25.5	29.4	28.0	47.1	56.7	52.2
Bu-SS2	144	151	147.8	-	-	-	-	-	-
Bu-SS3	158	189	181.4	-	-	-	23.6	30.9	26.8
Bu-SW1	126	133	128.6	38.0	41.0	39.3	48.2	53.0	50.5
Bu-KS2	95	134	107.6	26.7	36.2	30.7	47.8	66.4	54.2
Bu-KW1	80	99	90.6	33.8	39.4	36.4	47.5	60.1	51.0
Bu-KK3	70	78	72,8	22,9	26,4	25,1	35,6	47,4	42,4
Fi-SS2	143	149	145.4	24.6	28.1	27.0	40.4	55.8	46.3
Ei-SS3	122	291	219.8	-	-	-	30.2	40.2	36.3
Ei-KS2	120	134	126.0	-	-	-	-	-	-
Ei-KK2	136	139	137,8	21,1	25,7	23,9	39,87	49,21	44,14
Fi-MF	85	93	89.0						
Fi-WF	83	92	87.0						
Fi-VN	118	127	123.0				siehe Abschnitt 3.2.3		
Ta-MF	95	112	103.0						
Ta-WF	94	109	98.0						
Ta-VN	71	122	97.0						

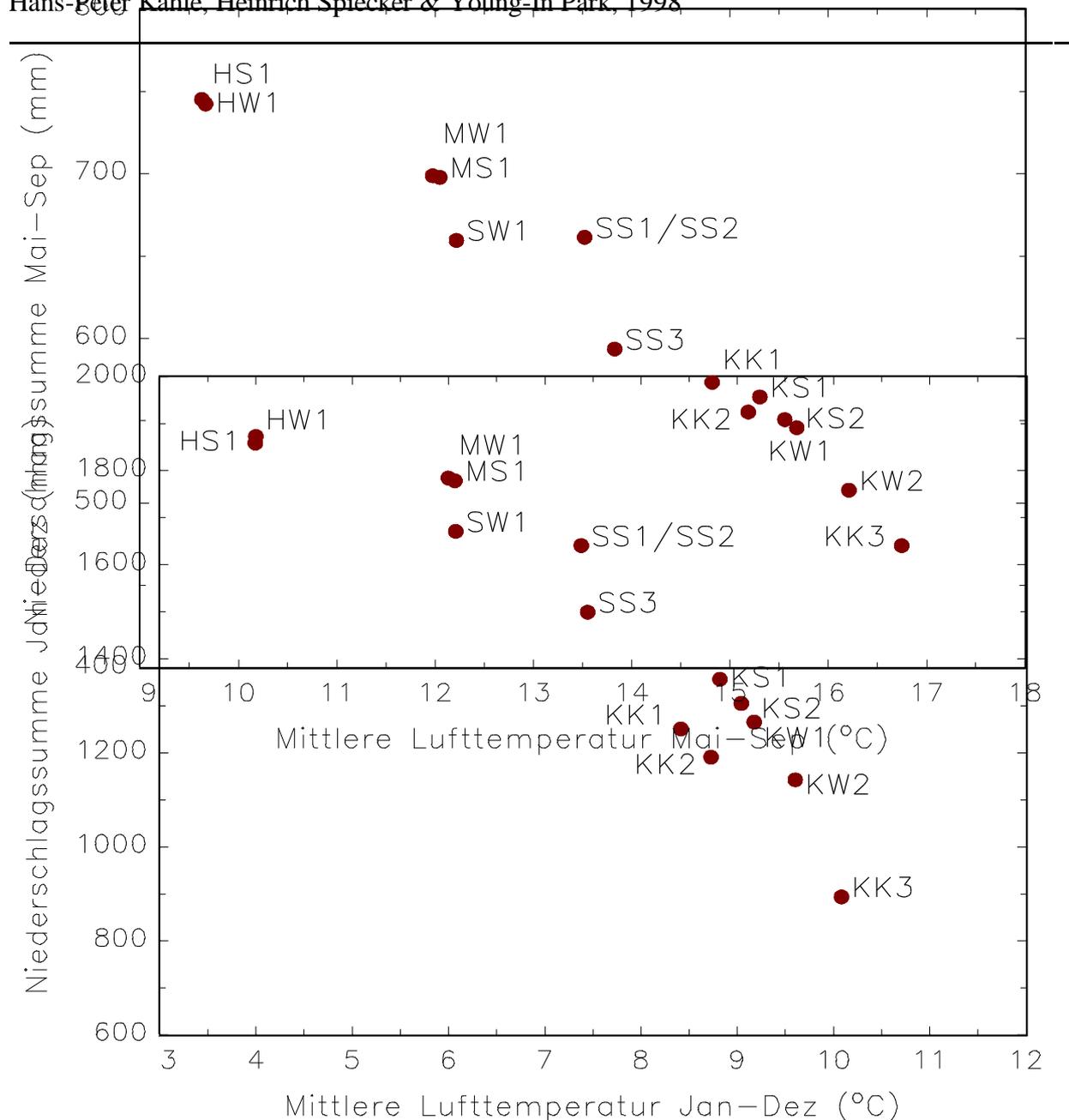
* Bezogen auf das Jahr des Einschlags: 1995, mit Ausnahme von Bu-SS3, Bu-SW1 und Ei-SS3: 1993.

2.4 Klimadaten

Tabelle 2-4-1 enthält eine Liste der Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes von denen Klimadaten zur Berechnung von Klimaparametern für die jeweiligen Untersuchungsstandorte verwendet wurden.

Tabelle 2-4-1: Liste der Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes von denen Klimadaten zur Berechnung von Klimaparametern für die jeweiligen Untersuchungsstandorte verwendet wurden.

Nr.	Klimastation		Klimadaten verwendet für die Untersuchungsstandorte
	Amtlicher Stationsname	Höhe üNN m	
02305	Vogtsburg-Oberrotweil	223	KK1, KK2, KK3
02306	Liliental bei Ihringen	284	SW1, KK1, KK2, KK3
02310	Freiburg i. Br. - Herdern	255	SW1, KK1, KK2, KK3
02311	Freiburg i. Br. (WA)	269	SS3, SW1
02320	Feldberg/Schw. (Wst)	1486	HS1, KS1, SS1, SS2, KS2, KW1
02322	Badenweiler	412	HW1, MS1, MW1, KW2
02323	Friedrichsheim	852	MS1, MW1
02336	Obermünstertal	545	HS1, KS1, SS1, SS2, KS2, KW1
02739	Villingen-Schwenningen	720	SW1
02761	Bonndorf/Schw.	876	HW1, MS1, MW1
02767	Titisee-Neustadt-Titisee	860	HS1, SS1, SS2, KS1, KS2
02770	Waldau-Jostal	1005	SS3
02771	Hinterzarten	883	HS1, SS1, SS2, KS1, KS2
02773	Lenzkirch	818	HS1, HW1, MS1, MW1, SS1, SS2, KS2, KW1, KW2
02774	Menzenschwand	885	HS1, HW1, MS1, MW1, KS2, KW1, KW2
02775	Schluchsee	963	HS1, HW1, MS1, MW1, KW2
02776	Sankt Blasien	785	MS1, MW1
02781	Sankt Märgen	896	SS3, SW1



3. Ergebnisse

3.1 Verlauf von Klima und Witterung in den Untersuchungsgebieten

Tabelle 3-1-1 zeigt die mittleren Lufttemperaturen und mittleren Niederschlagssummen in den Monaten Januar bis Dezember und Mai bis September an den Untersuchungsstandorten (Bezugszeitraum 1961-1990). In den Abbildungen 3-1-1 und 3-1-2 sind für die Untersuchungsstandorte die mittleren Niederschlagssummen über den mittleren Lufttemperaturen grafisch dargestellt.

Die Untersuchungsstandorte liegen entlang eines klimatischen Gradienten der sich von den kühlfeuchten Hochlagenstandorten zu den warm-trockenen Tieflagenstandorten erstreckt (vgl. Verteilung der Untersuchungsstandorte in den Abbildungen 3-1-1 und 3-1-2 von links oben nach rechts unten). Die maximale Differenz der mittleren Lufttemperatur zwischen den Untersuchungsstandorten beträgt 6.1 °C (Januar-Dezember) bzw. 7.1 °C (Vegetationsperiode: Mai-September). Die maximale Differenz der mittleren Niederschlagssumme beträgt 960 mm (Januar-Dezember) bzw. 270 mm (Mai-

September) (vgl. Tabelle 3-1-1).

Die Quotienten aus mittlerer Niederschlagssumme und mittlerer Lufttemperatur (Regenfaktor nach Lang, Arbeitskreis Standortkartierung 1980) betragen für die am höchsten und tiefsten gelegenen Untersuchungsstandorte bei Betrachtung des Zeitraums Januar bis Dezember 466 (HS1) bzw. 89 (KK3) und bei Betrachtung des Zeitraums Mai bis September 77 (HS1) bzw. 28 (KK3). Folglich ist der Regenfaktor am kühl-feuchten Hochlagenstandort am Feldberg im Mittel des Zeitraums 1961 bis 1990 5.3 (Januar bis Dezember) bzw. 2.8 (Mai bis September) mal größer als am warm-trockenen Standort im kollinen Kaiserstuhl.

Tabelle 3-1-1: Mittlere Lufttemperaturen und mittlere Niederschlagssummen in den Monaten Januar bis Dezember und Mai bis September an den Untersuchungsstandorten (Bezugszeitraum 1961-1990).

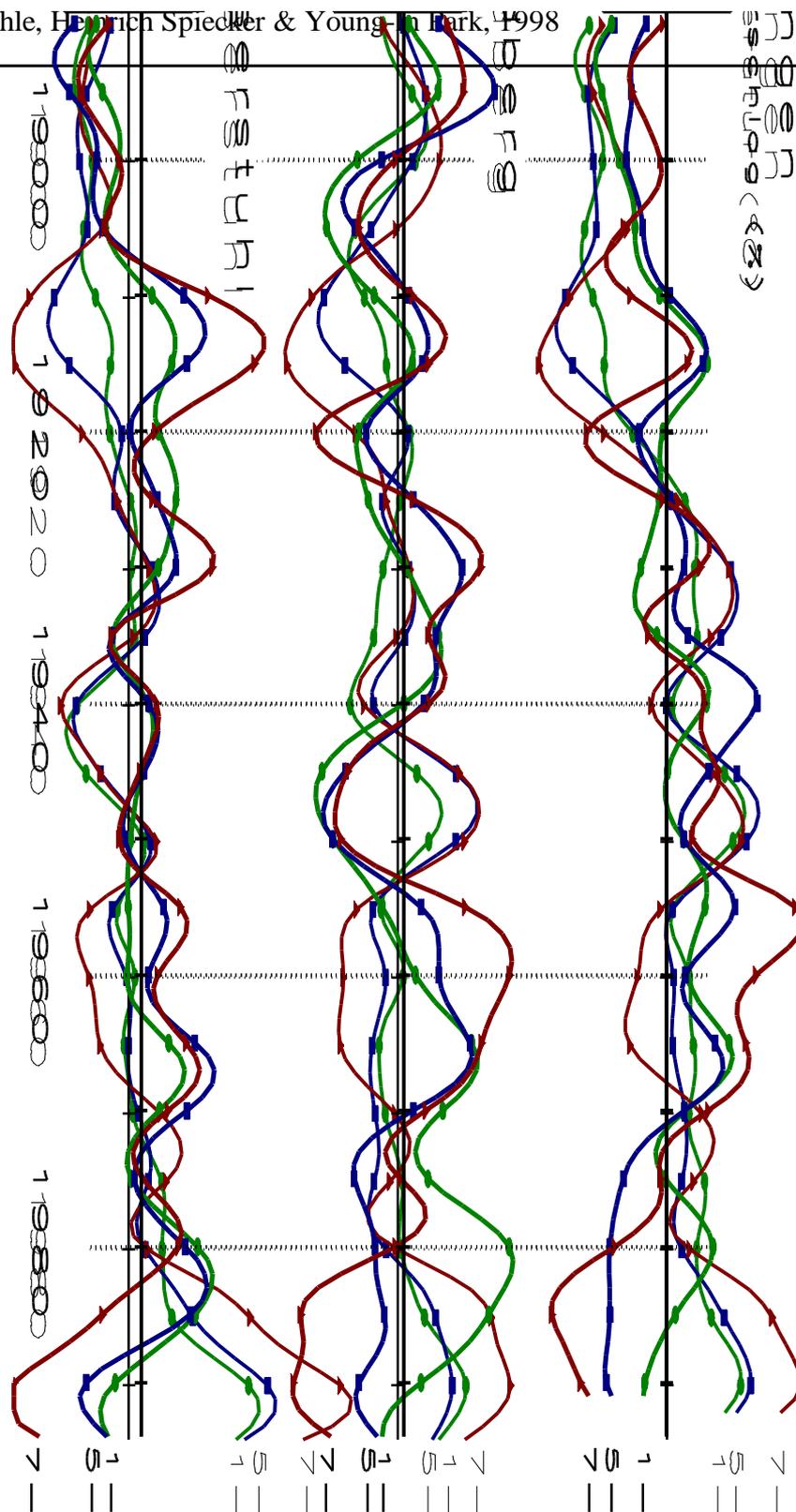
ID	Januar-Dezember		Mai-September	
	T _a [*] °C	N ^{**} mm	T _a [*] °C	N ^{**} mm
HS1	3.99	1858	9.63	745
HW1	4.00	1872	9.66	742
MS1	6.07	1778	12.05	698
MW1	6.00	1784	11.98	699
SS1/2	7.38	1640	13.52	661
SS3	7.44	1499	13.83	593
SW1	6.07	1670	12.22	659
KS1	8.82	1356	15.30	564
KS2	9.04	1305	15.56	551
KW1	9.17	1265	15.68	546
KW2	9.60	1142	16.21	508
KK1	8.41	1250	14.82	573
KK2	8.73	1190	15.18	555
KK3	10.08	894	16.74	474

* T_a: Mittlere Lufttemperatur
 ** N: Mittlere Niederschlagssumme.

Abbildung 3-1-3 zeigt den Verlauf der Lufttemperatur und Abbildung 3-1-4 den Verlauf der Niederschlagssummen über den Kalenderjahren für die Untersuchungsgebiete Villingen (Ost-schwarzwald, montan), Feldberg (Hochschwarzwald, hochmontan) und Kaiserstuhl (Oberrheinische Tiefebene, kollin) in verschiedenen Bezugsperioden. Zur Verdeutlichung mittel- und langfristiger

Schwankungen wurden die Wertereihen mit einem kubischen Splinefilter (50%-Frequenzschwelle: 10 Jahre) geglättet.

In allen hier dargestellten Gebieten und Bezugsperioden ist ein tendenzieller Anstieg der mittleren Lufttemperaturen innerhalb des vergangenen über 100jährigen Zeitraums festzustellen. Der Anstieg der mittleren Lufttemperaturen ist in den Hochlagen des Südschwarzwalds weniger stark ausgeprägt als in den Vergleichsgebieten. Die Anstiegsraten liegen beim Jahresmittel geringfügig unter den Anstiegsraten der Vegetationszeitmittelwerte. Maximale Anstiegsraten sind in den Hochsommermonaten zu verzeichnen. Hier werden im Kaiserstuhlgebiet im jüngsten Jahrzehnt extrem hohe Werte erreicht.



Die Kurven der Niederschlagssummen (Abb. 3-1-4) verlaufen meist gegenläufig zu den Kurven der Lufttemperaturen. Überdurchschnittlich Lufttemperaturen sind meist gekoppelt mit unterdurchschnittlichen Niederschlagssummen. Langfristige Trends sind bei den Niederschlagssummen weniger stark ausgeprägt als bei den Lufttemperaturen. Auffallend ist die Phase mit extrem geringen Niederschlägen Ende der 40er Jahre in den Hochlagen des Südschwarzwalds. In derselben Zeit sind die Niederschläge im Ostschwarzwald und im Kaiserstuhlgebiet nur geringfügig reduziert. Große Unterschiede zwischen den einzelnen Bezugszeiträumen sind seit Anfang der 70er Jahre in den

dargestellten Gebieten des Südschwarzwalds, und etwa seit 1980 im Kaiserstuhlgebiet zu beobachten. Hier scheren die Kurven der mittleren Niederschlagssummen in einer während des über 100jährigen Zeitraums noch nie in dieser Art beobachteten Weise auseinander. Überdurchschnittlich hohen Jahresniederschlagssummen stehen weit unterdurchschnittliche Niederschlagssummen in der Vegetationsperiode, insbesondere aber in den Hochsommermonaten gegenüber.

Tabelle 3-1-2 enthält für die einzelnen Untersuchungsstandorte die mittlere potentielle klimatische Wasserbilanz in verschiedenen Bilanzierungsperioden im Zeitraum von 1885 bis 1996. Die Berechnung der potentiellen Evapotranspiration und der potentiellen klimatischen Wasserbilanz erfolgte nach dem Verfahren von THORNTHWAITE & MATHER (1955, siehe auch KAHLE 1994 und KAHLE & SPIECKER 1996).

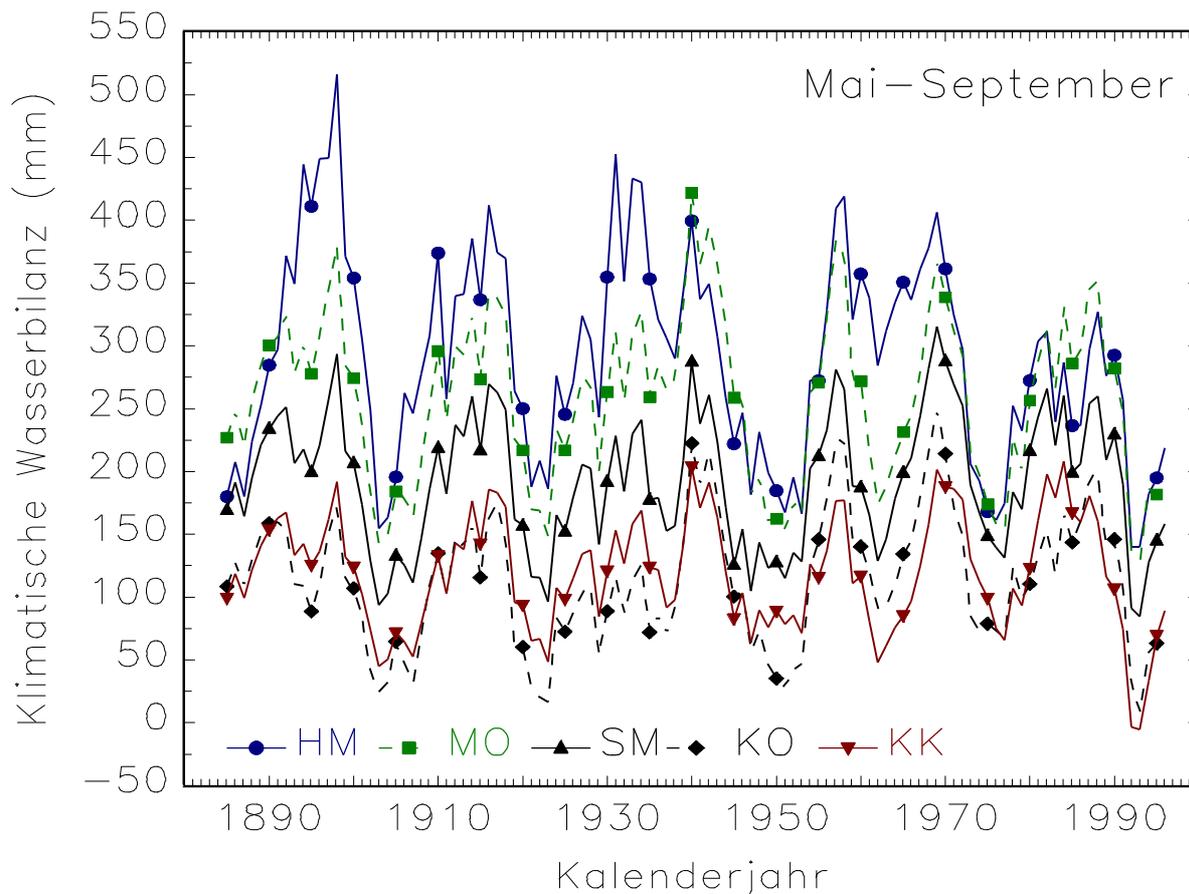
Tabelle 3-1-2: Mittlere potentielle, kumulierte klimatische Wasserbilanz an den Untersuchungsstandorten in verschiedenen Bilanzierungsperioden.

ID	Mittlere klimatische Wasserbilanz (1885-1996)		
	Januar-Dezember	Mai-September	Juli-August
	mm		
HS1	1194.4	292.5	99.2
HW1	1215.4	292.6	99.3
MS1	1007.3	257.3	86.9
MW1	1018.1	258.6	87.4
SS2	806.7	216.2	70.9
SS3	706.2	149.8	43.9
SW1	941.7	213.3	68.8
KS1	547.4	131.1	37.9
KS2	502.3	119.5	33.5
KW1	466.2	116.4	32.5
KW2	369.3	85.6	20.7
KK1	588.8	155.1	47.5
KK2	527.9	138.4	41.0
KK3	240.7	64.3	12.6

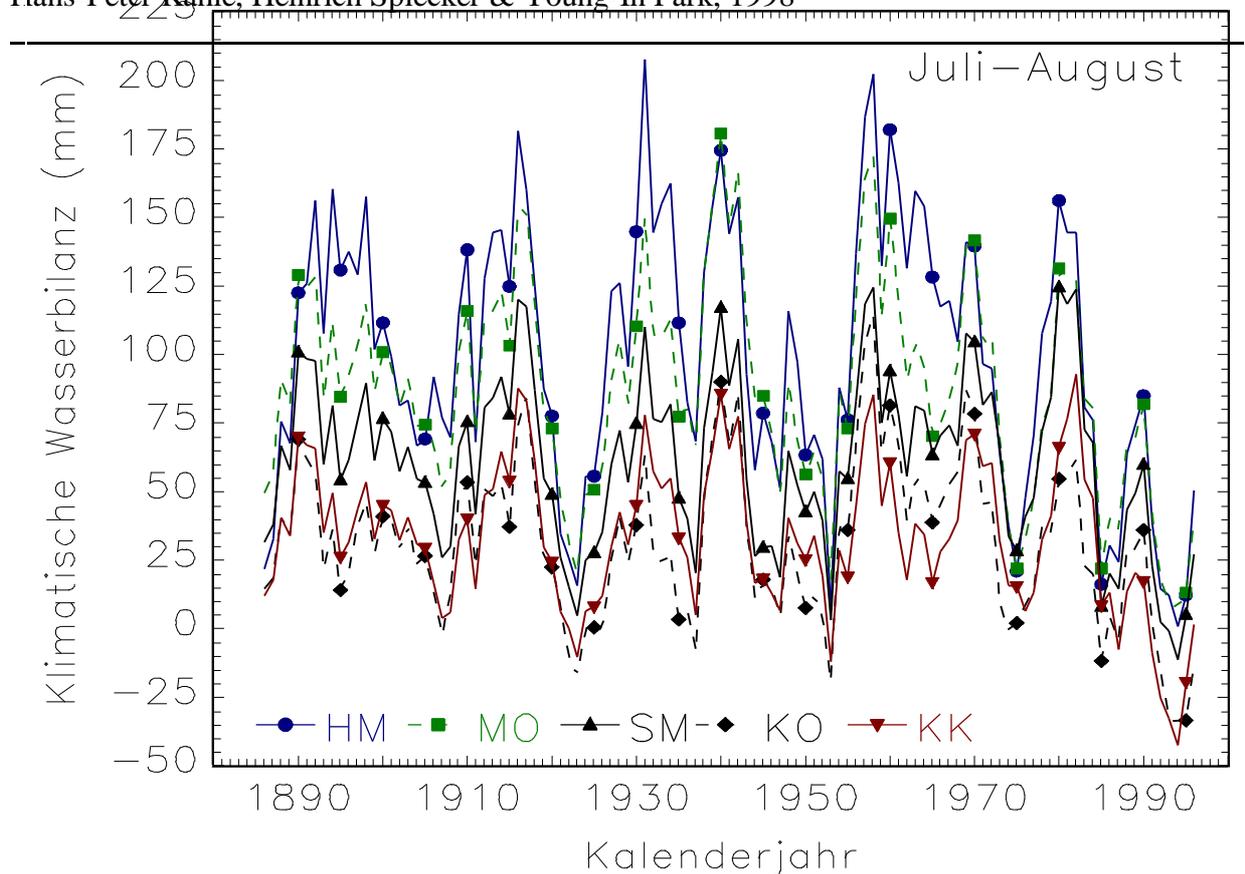
Im Zeitraum 1885 bis 1996 steht ein mittlerer jährlicher Wasserbilanzüberschuß von ca. 1200 mm in den Hochlagen einem solchen von 240 mm in der kollinen Höhenstufe im Kaiserstuhlgebiet

gegenüber. In den Hochsommermonaten Juli bis August sind die relativen Unterschiede noch größer: Der mittlere Wasserbilanzüberschuß von knapp 100 mm in den Hochlagen des Südschwarzwalds ist rund 8 mal größer als jener in der kollinen Höhenstufe im Kaiserstuhlgebiet. Hier werden die extremen Unterschiede in den klimatischen Wasserhaushaltsgrößen zwischen den Untersuchungsstandorten deutlich.

Die Abbildungen 3-1-5 und 3-1-6 zeigen den Verlauf der potentiellen klimatischen Wasserbilanz



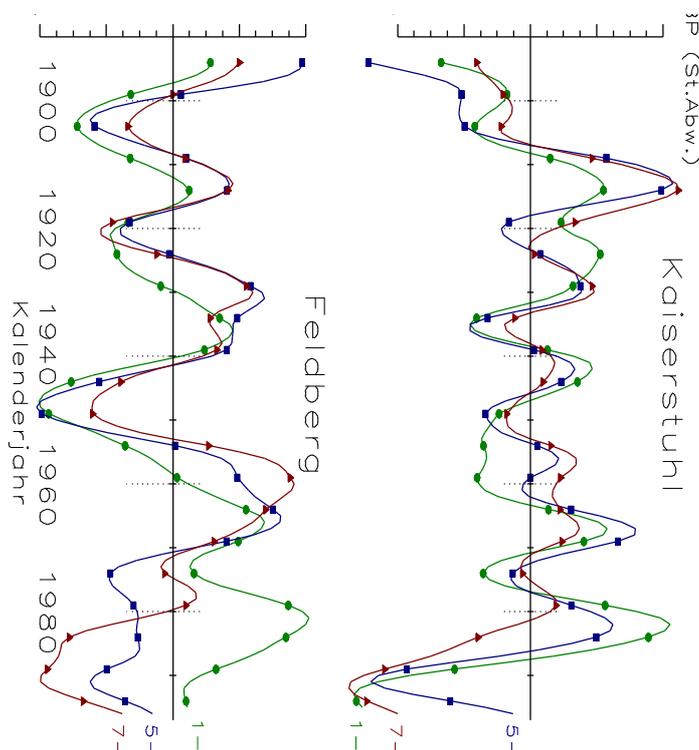
in den Bilanzierungsperioden Mai bis September bzw. Juli bis August im Zeitraum 1885 bis 1996 in verschiedenen Höhenlagen im Südschwarzwald und im Oberrheinischen Tiefland. Zur Verdeutlichung periodischer Variationen und zur Berücksichtigung zeitverzögerter Effekte auf das Baumwachstum, wurden die Wertereihen mit einem kausalen 5-jährigen gleitenden Mittel geglättet (kausal bedeutet, daß hier die Werte der 4 Jahre vor dem betreffenden Jahr sowie der Wert in dem betreffenden Jahr selbst, über dem der jeweilige Wert aufgetragen ist, einbezogen wurden).



Mehrjährige Phasen mit extrem geringen Wasserbilanzüberschüssen in der Vegetationsperiode (Mai bis September) traten um 1905, Anfang der 20er, Ende der 40er, Mitte der 70er und Anfang der 90er Jahre auf. Absolute Minimalwerte während des 112jährigen Zeitraums, sind in allen dargestellten Gebieten Anfang der 90er Jahre zu verzeichnen. Im Kaiserstuhlgebiet traten hier sogar absolute Wasserbilanzdefizite auf. Die Phasen geringer Wasserversorgung in der Vegetationsperiode korrespondieren weitgehend mit den entsprechenden Phasen der Bilanzierungsperiode Juli und August (Abb. 3-1-6). Hier werden jedoch auch größere Unterschiede im Verlauf der klimatischen Wasserbilanz zwischen den dargestellten Untersuchungsgebieten deutlich. So waren die Phasen relativ geringer Wasserversorgung um 1905 und Anfang der 20er Jahre in den Hochlagen des Südschwarzwalds weniger stark ausgeprägt als in den Tieflagen. Wie bei der Vegetationszeitbilanzierung ist auch hier Anfang der 90er Jahre ein starker Einbruch in der Wasserversorgung festzustellen. In den kollinen Lagen werden hier absolute Minimalwerte erreicht.

In Abbildung 3-1-7 ist der geglättete Verlauf der potentiellen klimatischen Wasserbilanz über den Kalenderjahren exemplarisch für die Untersuchungsgebiete Kaiserstuhl und Feldberg für jeweils drei verschiedene Bilanzierungsperioden dargestellt. Zur Berücksichtigung langfristiger zeitverzögerter Effekte auf das Baumwachstum wurden die Wertereihen zunächst mit einem kausalen 30jährigen gleitenden Mittel geglättet, und anschließend zur Verdeutlichung mittel- und langfristiger Schwankungen zusätzlich mit einem kubischen Splinefilter ausgeglichen (50%-Frequenzschwelle: 10 Jahre). Als Klimareferenzstationen wurden für das Gebiet Kaiserstuhl fünf Klima- bzw. Niederschlagsstationen des Deutschen Wetterdiensts (DWD) im Höhenbereich 192 m bis 284 m üNN (02305 Oberrotweil, 02306 Liliental, 02311 Freiburg (WA), 70291 Breisach, 70370 Eichstetten), für das Gebiet Feldberg vier Klimastationen im Höhenbereich 785 m - 1486 m üNN (02320 Feldberg, 02775 Schluchsee, 02776 St. Blasien, 02777 Höchenschwand) herangezogen.

Die unterdurchschnittlichen Vegetationszeitwasserbilanzen Anfang der 20er, Ende der 40er und Mitte der 70er Jahre, sowie die relativen Wasserbilanzdefizite in den Hochsommermonaten Mitte der 80er Jahre, sind in den Hochlagen des Südschwarzwalds stärker ausgeprägt als im Kaiserstuhlgebiet. Ab 1990 ist in der Tieflage jedoch eine Periode mit extremen relativen Wasserbilanzdefiziten festzustellen, deren Ausmaß im Feldberggebiet nicht erreicht wird. Seit Mitte der 70er Jahre ist im Kaiserstuhlgebiet ein Auseinanderdriften der saisonalen Wasserbilanzen festzustellen: Überdurchschnittlichen jährlichen Wasserbilanzen stehen weit unterdurchschnittliche Wasserbilanzen in der Vegetationsperiode (Mai bis September) insbesondere aber in den Hochsommermonaten (Juli bis August) gegenüber.



3.2 Analyse der interannuellen Wachstumsreaktionen

3.2.1 Vergleich der Radialzuwachsreaktionen von Fichten, Tannen, Buchen und Eichen auf ausgewählten Standorten des Schwarzwalds und der Oberrheinischen Tiefebene

Tabelle 3-2-1 enthält einige deskriptive statistische Kenngrößen der Radialzuwachsreihen (nicht standardisierte Radialzuwachsrohwerter) der Untersuchungsbäume. Bezugszeitraum ist jeweils die individuelle Länge der Meßreihen. Da die Untersuchungsbäume unterschiedlich alt sind, unterscheiden sich die Bezugszeiträume zwischen den Bäumen. Insgesamt wurden für die interannuelle Untersuchung der Radialzuwächse 20.530 Jahrringe vermessen.

Tabelle 3-2-1: Kenngrößen der Radialzuwachsreihen (nicht standardisierte Rohwerte) der Untersuchungsbäume bezogen auf die baumindividuelle Länge der Meßreihen.

ID	Anzahl		Radialzuwachs					
	UB*	Jahre	Inter. Korr.**	– mm·a ⁻¹	Max mm·a ⁻¹	Std [†] mm·a ⁻¹	AK Lag I [‡]	Mittl. Sens. [§]
Fichte								
HS1	5	663	0.750	1.84	4.93	0.735	0.866	0.150
HW1	5	604	0.753	2.13	4.83	0.904	0.870	0.153
MS1	5	759	0.642	2.07	6.33	0.971	0.862	0.184
MW1	5	608	0.674	2.64	7.36	0.900	0.811	0.165
KS1	4	458	0.698	1.99	6.22	0.815	0.768	0.214
KW2	5	475	0.650	2.82	7.12	1.111	0.782	0.206
KK3	5	418	0.466	3.09	8.34	1.068	0.728	0.191
MF	5	444	0.872	2.72	8.43	1.110	0.857	0.160
WF	5	436	0.636	2.40	4.74	0.774	0.783	0.163
VN	5	615	0.603	1.78	4.81	0.589	0.783	0.163
Fi-Gesamt	49	5480	0.469	2.30	8.43	0.887	0.817	0.173
Tanne								
MS1	5	738	0.535	2.24	6.25	1.080	0.881	0.187
MW1	5	681	0.375	2.58	8.52	0.929	0.811	0.162
SS1	5	689	0.786	2.31	9.75	1.318	0.788	0.261
KS2	5	595	0.525	2.61	7.90	1.108	0.721	0.242
KW2	5	471	0.608	3.16	7.15	1.359	0.744	0.260
KK1	5	347	0.492	3.26	6.42	1.104	0.538	0.256
MF	5	516	0.450	2.33	5.74	0.950	0.801	0.183
WF	5	491	0.676	2.44	7.14	1.137	0.874	0.176
VN	5	577	0.400	2.23	7.08	1.153	0.871	0.201
Ta-Gesamt	45	5105	0.350	2.52	9.75	1.123	0.795	0.212
Eiche								
SS2	5	727	0.761	1.63	4.69	0.585	0.721	0.192
SS3	5	1099	0.506	0.85	6.05	0.391	0.824	0.172
KS2	5	630	0.556	2.16	7.27	0.909	0.715	0.243
KK2	5	689	0.697	1.64	4.41	0.519	0.413	0.260

ID	Anzahl		Radialzuwachs					
	UB*	Jahre	Inter. Korr.**	– mm·a ⁻¹	Max mm·a ⁻¹	Std [†] mm·a ⁻¹	AK Lag 1 [‡]	Mittl. Sens. [§]
Ei-Gesamt	20	3145	0.396	1.46	7.27	0.568	0.688	0.210
Buche								
HS1	5	707	0.672	1.37	3.71	0.613	0.433	0.430
HW1	5	808	0.835	1.21	4.22	0.643	0.631	0.393
MS1	5	814	0.630	1.64	3.83	0.587	0.590	0.276
MW1	5	823	0.465	1.62	3.99	0.691	0.734	0.277
SS2	5	739	0.822	1.75	5.81	0.951	0.836	0.251
SS3	5	911	0.690	1.14	6.74	0.834	0.823	0.212
SW1	5	643	0.808	2.00	4.03	0.631	0.759	0.176
KS2	5	538	0.765	2.58	5.53	0.929	0.626	0.247
KW1	5	453	0.407	2.88	6.23	0.975	0.591	0.245
KK3	5	364	0.817	2.99	7.07	1.320	0.776	0.252
Bu-Gesamt	50	6800	0.420	1.77	7.07	0.778	0.683	0.280

* UB: Untersuchungsbäume.

** Mittlere Interserienkorrelation: Referenz ist die jeweils aus den Radialzuwachsreihen aller anderen Bäume im jeweiligen Bezugskollektiv gebildete mittlere Radialzuwachsreihe. Angegeben sind die Mittelwerte des Pearson'schen (Kreuz-) Korrelationskoeffizienten, r_{xy} , mit $v = n-2$ FG. Alle Werte sind signifikant, $\{\text{Prob} > |r_{xy}|\} \leq 0.0001$.

† Standardabweichung, s .

‡ Mittelwerte der Autokorrelationskoeffizienten, f_p , zu Lag $p = 1$, mit $v = n-3$ FG. Alle Werte sind signifikant, $\{\text{Prob} > |f_p|\} \leq 0.0001$.
Install Equation Editor and double-click here to view equation.

§ Mittelwert der (mittleren) Sensitivität, s , der einzelnen Bäume, dabei ist
Install Equation Editor and double-click here to view equation.
die jährliche Sensitivität, und x_t sind die Radialzuwachswerte des betreffenden Baumes in den Jahren $t = 1, 2, \dots, n$.

Die bei allen Untersuchungsbaumkollektiven hochsignifikante mittlere Interserienkorrelation ist Ausdruck für ein hohes Maß an Übereinstimmung in den kurzfristigen Zuwachsreaktionen. Die mittleren Interserienkorrelationen der einzelnen Standortkollektive sind systematisch größer als die der jeweiligen zusammengefaßten Baumartenkollektive. Dies weist darauf hin, daß neben gemeinsamen regionalen, auch lokal wirksame Einflußfaktoren in den Radialzuwachsreihen reflektiert werden. Wie an den Standardabweichungen der Radialzuwächse der jeweiligen Kollektive zu erkennen ist, sind die einzelnen Radialzuwachsreihen stark durch mittel- bis langfristige Varianzkomponenten beeinflusst.

Beim Vergleich der auf den maximalen gemeinsamen Überlappungszeitraum (1934-1993) bezogenen Radialzuwachsreihen (nicht standardisierte Rohwerte) lassen sich die folgenden Tendenzen erkennen

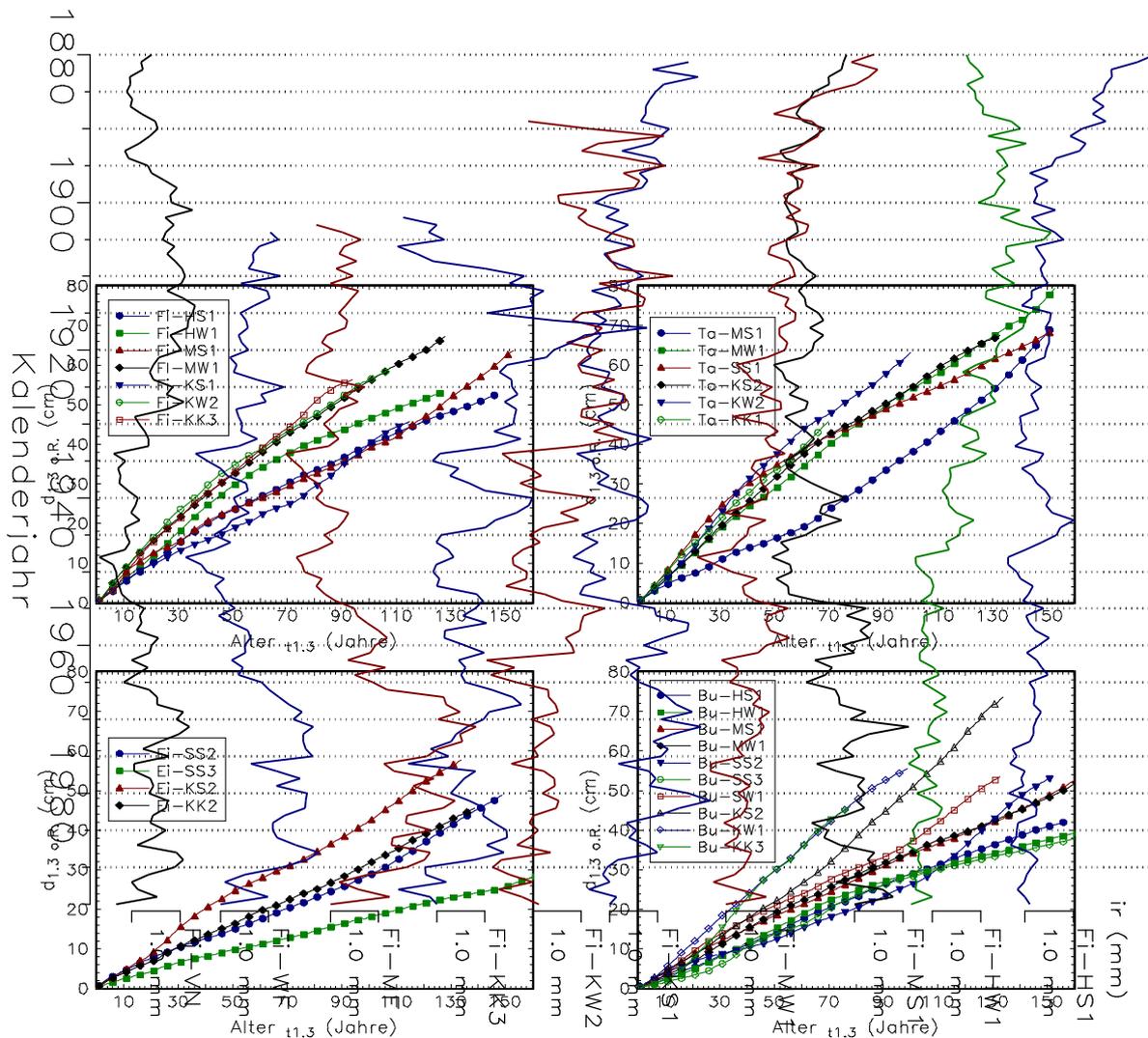
(Tab. 3-2-2): Oberhalb der submontanen Höhenstufe sind die mittleren Radialzuwächse der Fichten, Tannen und Buchen von Standorten an Sommerhängen größer als die der Vergleichsbäume von Standorten an Winterhängen. In der kollinen Höhenstufe kehren sich die Verhältnisse um. Bei den untersuchten Fichten aus dem Flächenschwarzwald nehmen im Zeitraum 1934 bis 1993 die mittleren Radialzuwächse der Bäume von dem Missestandort (VN) zu denen der Bäume vom mäßig-frischen Standort (MF) hin zu, bei der Tanne ab. Beim Vergleich der Radialzuwachsrohwerter ist zu berücksichtigen, daß hier alters-, dimensions- und standraumbezogene Unterschiede die standortbezogenen Unterschiede überlagern oder verschleiern können. Das Durchmesserwachstum der untersuchten Bäume ist in Abbildung 3-2-1 über dem Alter in Brusthöhe dargestellt.

Tabelle 3-2-2: Kenngrößen der Radialzuwachsreihen (nicht standardisierte Rohwerte) der Untersuchungsbäume bezogen auf den maximalen gemeinsamen Überlappungszeitraum (1934-1993) (Erläuterungen siehe Fußnoten Tabelle 3-2-1).

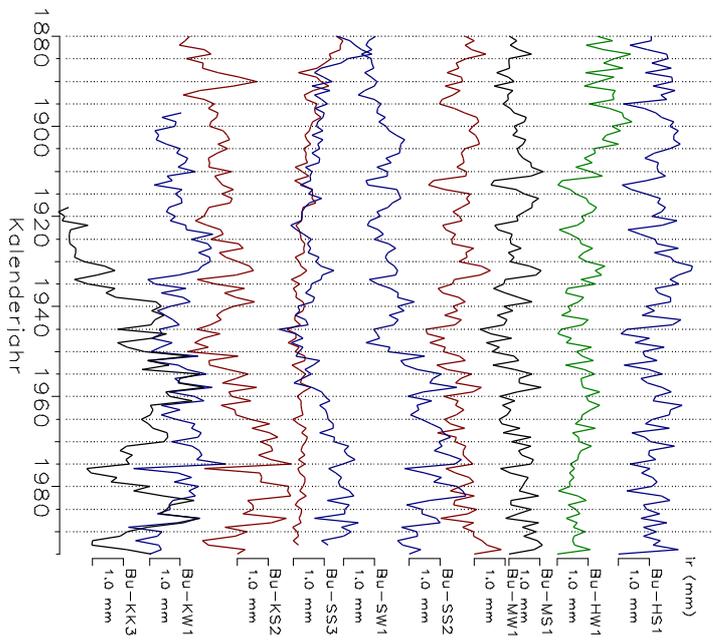
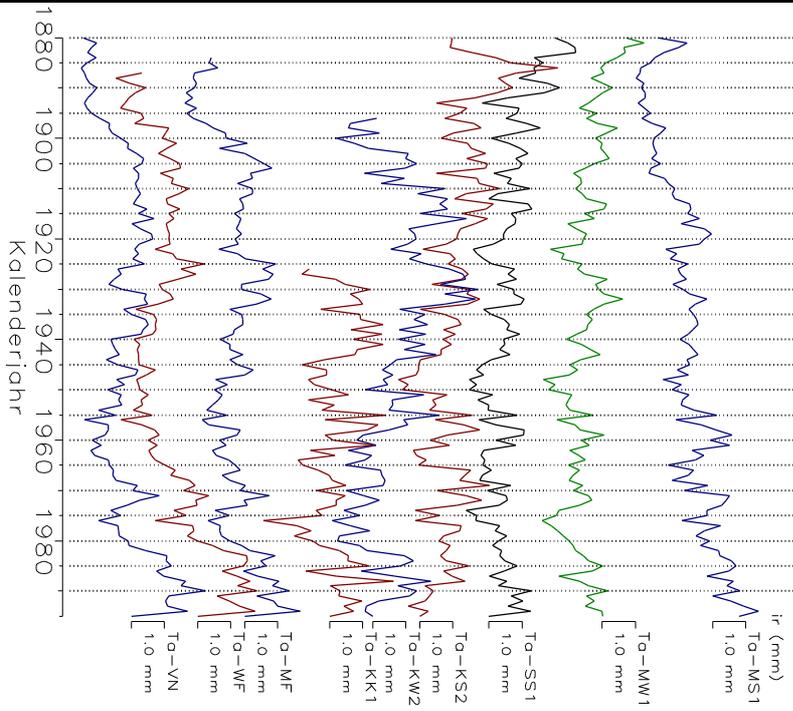
Logo	Anzahl		Radialzuwachs					
	UB	Jahre	Inter. Korr.	– mm·a ⁻¹	Max mm·a ⁻¹	Std mm·a ⁻¹	AK <i>Lag 1</i>	Mittl. Sens.
Fichte								
HS1	5	300	0.698	1.56	2.90	0.348	0.684	0.144
HW1	5	300	0.793	1.49	3.42	0.407	0.693	0.147
MS1	5	300	0.650	2.21	5.86	0.821	0.747	0.210
MW1	5	300	0.610	2.15	4.33	0.533	0.614	0.179
KS1	4	240	0.845	2.11	6.22	0.827	0.783	0.211
KW2	5	300	0.630	2.36	5.28	0.717	0.603	0.211
KK3	5	300	0.498	2.84	6.77	0.863	0.661	0.192
MF	5	300	0.908	2.99	8.43	1.214	0.874	0.149
WF	5	300	0.787	2.44	4.74	0.813	0.803	0.157
VN	5	300	0.748	1.60	3.22	0.501	0.731	0.175
Fi-Gesamt	49	2940	0.497	2.18	8.43	0.702	0.718	0.177
Tanne								
MS1	5	300	0.393	2.82	6.04	0.921	0.745	0.184
MW1	5	300	0.355	2.29	4.39	0.738	0.733	0.182
SS1	5	300	0.762	1.61	3.63	0.539	0.482	0.283
KS2	5	300	0.545	2.26	6.14	0.877	0.612	0.271
KW2	5	300	0.587	2.82	7.06	1.059	0.606	0.278

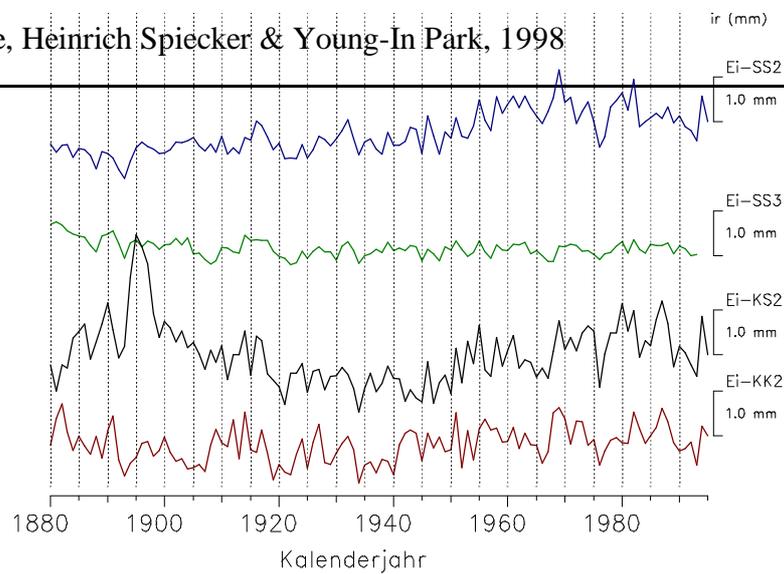
Logo	Anzahl		Radialzuwachs					
	UB	Jahre	Inter. Korr.	–	Max	Std	AK <i>Lag 1</i>	Mittl. Sens.
				mm·a ⁻¹	mm·a ⁻¹	mm·a ⁻¹		
KK1	5	300	0.577	3.22	6.42	1.056	0.512	0.260
MF	5	300	0.598	2.29	5.74	0.789	0.753	0.181
WF	5	300	0.731	2.48	7.14	1.284	0.892	0.174
VN	5	300	0.392	2.51	7.08	1.215	0.878	0.195
Ta-Gesamt	5	2700	0.489	2.48	7.14	0.942	0.690	0.223
Eiche								
SS2	5	300	0.764	1.89	4.69	0.535	0.563	0.195
SS3	5	300	0.416	1.01	3.23	0.211	0.509	0.159
KS2	5	300	0.816	2.04	4.60	0.655	0.533	0.250
KK2	5	300	0.774	1.70	3.22	0.442	0.319	0.225
Ei-Gesamt	20	1200	0.629	1.66	4.69	0.461	0.481	0.208
Buche								
HS1	5	300	0.813	1.28	2.81	0.521	0.158	0.474
HW1	5	300	0.861	0.84	2.03	0.359	0.277	0.442
MS1	5	300	0.811	1.53	3.09	0.544	0.382	0.346
MW1	5	300	0.705	1.42	3.10	0.544	0.442	0.353
SS2	5	300	0.749	2.40	5.81	0.997	0.736	0.227
SS3	5	300	0.720	0.77	1.43	0.169	0.326	0.212
SW1	5	300	0.880	2.06	3.69	0.673	0.745	0.199
KS2	5	300	0.853	2.87	5.53	0.967	0.577	0.255
KW1	5	300	0.624	2.80	6.23	0.844	0.356	0.275
KK3	5	300	0.762	3.30	7.07	1.165	0.669	0.244
Bu-Gesamt	50	3000	0.524	1.93	7.07	0.678	0.467	0.303

Bei allen hier untersuchten Bäumen zeigt sich die Tendenz, daß mit zunehmender Meereshöhe des Standorts die Bäume langsamer in die Dicke wachsen.



In den Abbildungen 3-2-2 bis 3-2-5 sind die mittleren Radialzuwachsverläufe der Untersuchungsbaumkollektive über den Kalenderjahren dargestellt. Hier werden lang-, mittel- und kurzfristige Zuwachsschwankungen, sowie beim Vergleich zwischen den mittleren Radialzuwachsverläufen der verschiedenen Untersuchungsbaumkollektive, synchrone und standortspezifische Radialzuwachsreaktionen im Laufe der Zeit deutlich.





Um baumindividuelle alters- und dimensionsbezogene sowie durch Standraum- und Standortveränderungen bedingte niederfrequente Zuwachsveränderungen von den hochfrequenten Klimasignalen zu trennen, wurden die Radialzuwachsreihen auf der Basis des Stochastischen Trendmodells (KAHLE 1994, KAHLE & SPIECKER 1996) baumweise in mittelwertstationäre Reihen transformiert (standardisiert) und durch Mittelbildung zu Radialzuwachschronologien aggregiert.

Tabelle 3-2-3 enthält Kenngrößen der standardisierten Radialzuwachschronologien der Untersuchungsbäume bezogen auf den maximalen gemeinsamen Überlappungszeitraum (1934-1993).

Tabelle 3-2-3: Kenngrößen der Radialzuwachschronologien (standardisierte Indexwerte) der Untersuchungsbäume bezogen auf den maximalen gemeinsamen Überlappungszeitraum (1934-1993).

ID	Anzahl		Radialzuwachsindex					
	UB*	Jahre	Inter. Korr.**	–	Max	Std [†]	AK Lag I [‡]	Mittl. Sens. [§]
Fichte								
HS1	5	300	0.719	1.00	1.71	0.183	0.513	0.142
HW1	5	300	0.737	1.00	1.50	0.178	0.451	0.146
MS1	5	300	0.667	1.02	2.15	0.299	0.612	0.208
MW1	5	300	0.639	0.99	1.66	0.218	0.533	0.178
KS1	4	240	0.845	0.98	2.00	0.295	0.652	0.210
KW2	5	300	0.742	0.98	1.74	0.267	0.489	0.211
KK3	5	300	0.522	1.01	2.53	0.288	0.581	0.190
MF	5	300	0.775	0.99	1.53	0.205	0.618	0.148
WF	5	300	0.747	1.00	1.50	0.186	0.483	0.153
VN	5	300	0.659	0.97	1.52	0.211	0.513	0.172
Fi-Gesamt	49	2940	0.574	1.00	2.53	0.232	0.542	0.175

Tanne

ID	Anzahl		Radialzuwachsindex					
	UB*	Jahre	Inter. Korr.**	–	Max	Std [†]	AK Lag I [‡]	Mittl. Sens. [§]
MS1	5	300	0.640	0.99	1.79	0.206	0.379	0.183
MW1	5	300	0.564	0.97	1.89	0.241	0.558	0.181
SS1	5	300	0.808	0.98	1.90	0.306	0.336	0.283
KS2	5	300	0.723	0.99	1.86	0.325	0.425	0.271
KW2	5	300	0.587	1.00	2.01	0.309	0.407	0.276
KK1	5	300	0.688	1.00	1.85	0.267	0.305	0.251
MF	5	300	0.647	0.98	1.66	0.240	0.564	0.179
WF	5	300	0.701	0.97	1.60	0.193	0.371	0.172
VN	5	300	0.439	0.99	1.69	0.256	0.602	0.179
Ta-Gesamt	5	2700	0.553	1.00	2.01	0.260	0.439	0.219
Eiche								
SS2	5	300	0.752	0.98	1.71	0.189	0.178	0.195
SS3	5	300	0.323	1.04	1.98	0.183	0.324	0.161
KS2	5	300	0.762	1.00	1.75	0.239	0.116	0.249
KK2	5	300	0.798	0.99	1.67	0.233	0.217	0.224
Ei-Gesamt	20	1200	0.484	1.00	1.98	0.211	0.209	0.207
Buche								
HS1	5	300	0.815	0.99	2.10	0.392	0.115	0.474
HW1	5	300	0.863	0.97	1.95	0.377	0.138	0.441
MS1	5	300	0.798	0.99	1.91	0.311	0.197	0.345
MW1	5	300	0.794	0.96	1.88	0.317	0.228	0.352
SS2	5	300	0.743	0.99	1.85	0.278	0.486	0.226
SS3	5	300	0.534	1.01	1.56	0.202	0.207	0.215
SW1	5	300	0.757	1.01	1.89	0.212	0.318	0.194
KS2	5	300	0.795	1.00	1.65	0.268	0.346	0.254
KW1	5	300	0.718	1.00	1.74	0.255	0.090	0.275
KK3	5	300	0.807	1.03	1.95	0.317	0.553	0.243
Bu-Gesamt	50	3000	0.449	1.00	2.10	0.293	0.268	0.302

* UB: Untersuchungsbäume.

** Mittlere Interserienkorrelation: Referenz ist die jeweils aus den Radialzuwachsindexreihen aller anderen Bäume im jeweiligen

Bezugskollektiv gebildete mittlere Radialzuwachschronologie. Angegeben sind die Mittelwerte des Pearson'schen (Kreuz-) Korrelationskoeffizienten, r_{xy} , mit $v = n-2$ FG. Alle Werte sind signifikant, $\{\text{Prob} > |r_{xy}|\} \leq 0.0001$.

† Standardabweichung, s .

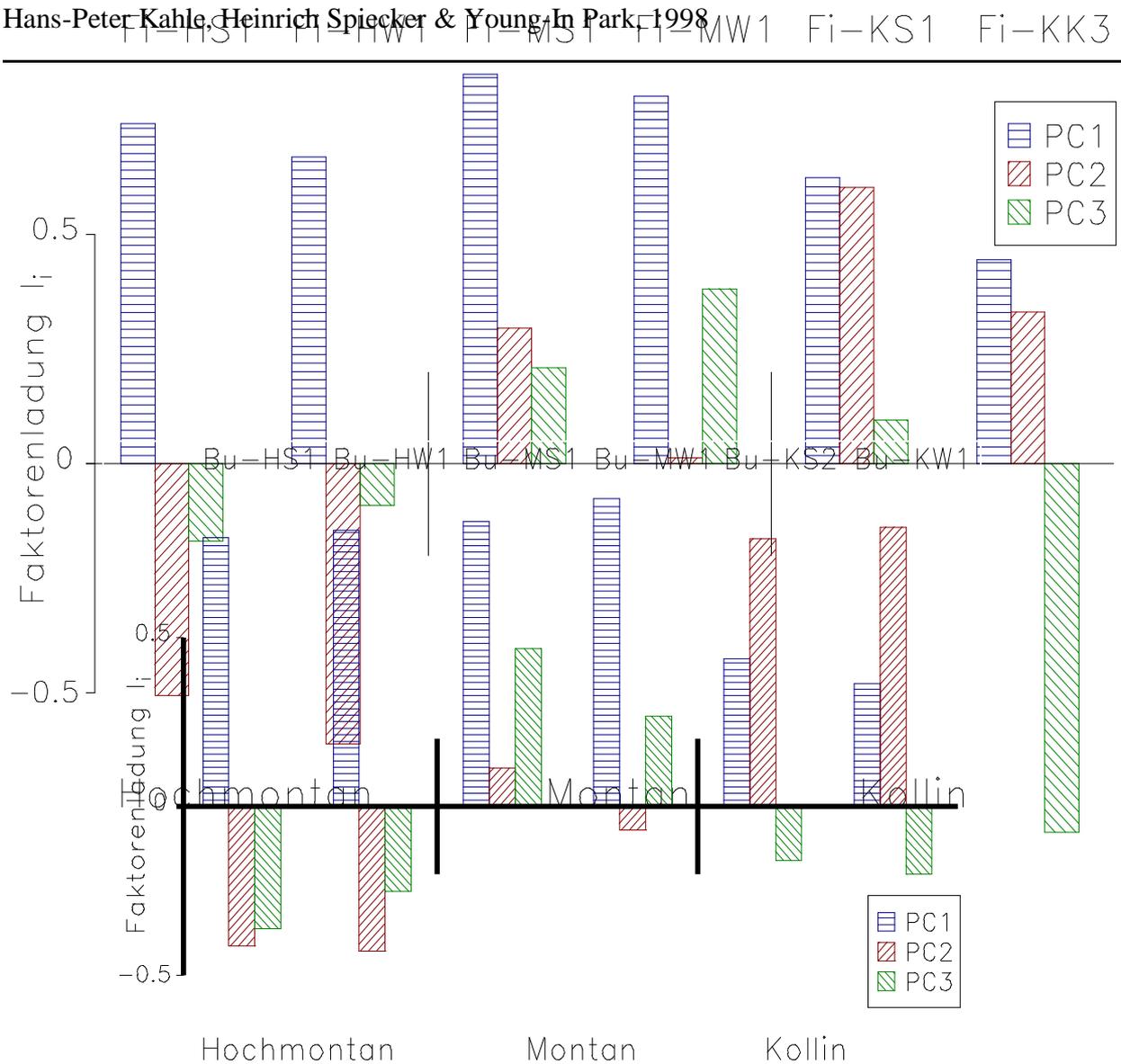
‡ Mittelwerte der Autokorrelationskoeffizienten, f_p , zu Lag $p = 1$, mit $v = n-3$ FG. Alle Werte sind signifikant, $\{\text{Prob} > |f_1|\} \leq 0.0001$.

§ Mittelwert der (mittleren) Sensitivität, s_t , der einzelnen Bäume, dabei ist s_t die jährliche Sensitivität, und x_t sind die Radialzuwachsindexwerte des betreffenden Baumes in den Jahren $t = 1, 2, \dots, n$.

Die Chronologien der untersuchten Fichten von SW-exponierten Sommerhängen weisen im Zeitraum 1934 bis 1993 eine größere Autokorrelationen zu Lag 1 auf als die Vergleichschronologien von NE-exponierten Winterhängen (Tabelle 3-2-3). Bezüglich der mittleren Sensitivität sind bei den untersuchten Fichten keine klaren Zusammenhänge zur Höhenlage oder Exposition des Standorts zu erkennen. Während bei den untersuchten Tannen und Eichen die mittlere Sensitivität mit zunehmender Höhenlage abnimmt, nimmt sie bei den untersuchten Buchen von der submontanen zur hochmontanen Höhenstufe systematisch zu. Im Mittel beträgt die Sensitivität der Fichtenchronologien 0.175. Mit einer mittleren Sensitivität von 0.219 reagieren die untersuchten Tannen im Mittel sensibler. Der Vergleich der Radialzuwachschronologien von Fichten und Tannen die am selben Standort gewachsen sind zeigt jedoch, daß die Unterschiede nicht systematisch sind (z.B.: MW1 und MS1). Die stärkste Abhängigkeit von kurzfristig schwankenden Umwelteinflüssen ist bei den Buchen mit einer mittleren Sensitivität von 0.302 festzustellen. Die Sensitivität der untersuchten Eichen ist auf allen Standorten geringer als die der untersuchten Buchen.

Im Vergleich zu den Laubbäumen wird der Radialzuwachsverlauf der Nadelbaumarten stark durch systematische Pendelungen und/oder Tendenzen geprägt, wie an den deutlich größeren Autokorrelationskoeffizienten zu erkennen ist.

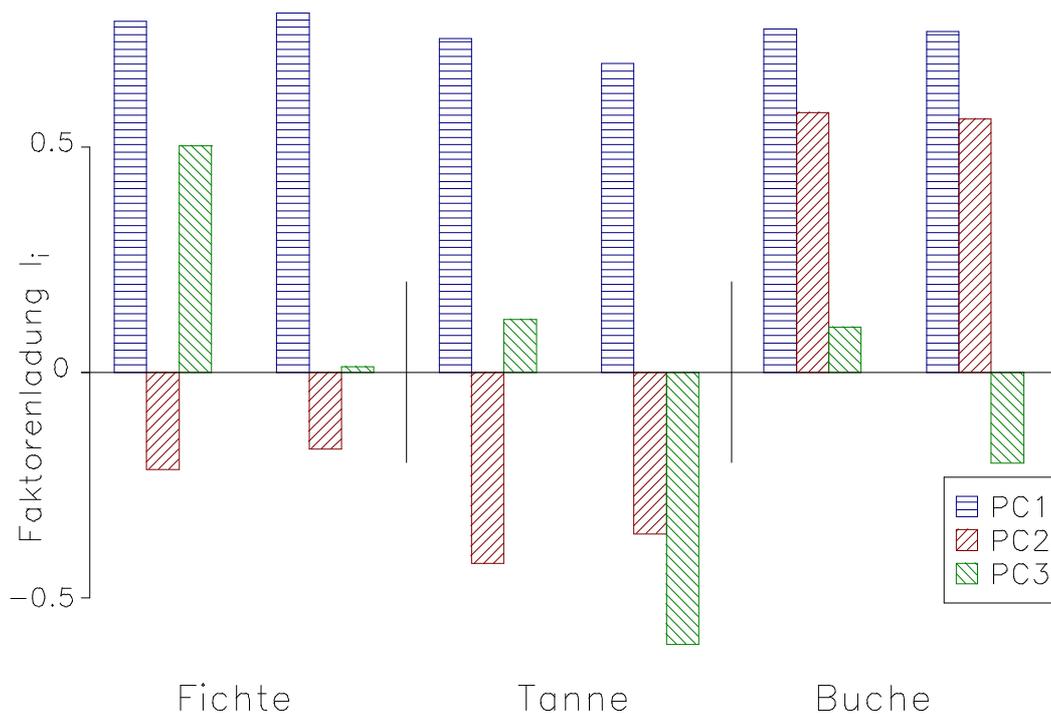
Werden die Standardabweichungen mit den Erwartungswerten gewichtet (da die Erwartungswerte der Radialzuwachschronologien eins betragen erübrigt sich bei diesen eine entsprechende Gewichtung), zeigt sich, daß die Standardisierung zu einer deutlichen Reduktion der mittel- bis langfristigen Varianzkomponenten geführt hat (vgl. Tab. 3-2-2).



In Abbildung 3-2-6 sind die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse von sechs nach der Höhenlage und Exposition des Standorts stratifizierten Fichten-Radialzuwachschronologien aus dem Schwarzwald und der Oberrheinischen Tiefebene dargestellt (Bezugszeitraum: 1902-1995). Nur die ersten beiden Hauptkomponenten sind signifikant (5 %-Niveau, Bartlett-Test). *PC1* erklärt 49.2 % und *PC2* erklärt 19.8 % der Gesamtvarianz. Die erste Hauptkomponente weist auf den Chronologien der Standorte von montanen Lagen die höchsten, auf den Chronologien der Standorte von der kollinen Höhenstufe die geringsten Faktorladungen auf. Die zweite Hauptkomponente ist polar ausgeprägt und trennt die Chronologien nach der Höhenlage des betreffenden Standorts: die Faktorladungen auf den Chronologien von Hochlagenstandorten weisen negative, auf den Vergleichschronologien aus der kollinen Höhenstufe positive Vorzeichen auf. Erst die dritte Hauptkomponente trägt bei den Tieflagenchronologien zu einer Expositionsdifferenzierung bei (positive Ladung auf der Variable Fi-KS1, negativ auf der Variable Fi-KK3) (nicht signifikant auf 5 %-Niveau).

Damit zeigt sich, daß die Radialzuwächse der hier dargestellten Fichtenchronologien durch einen gemeinsamen Einflußfaktor (*PC1*) synchronisiert sind, demgegenüber standortbezogene Muster in den Radialzuwachsreaktionen deutlich zurücktreten.

In Abbildung 3-2-7 sind die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse von sechs nach der Höhenlage und Exposition des Standorts stratifizierten Buchen-Radialzuwachschronologien aus dem



Schwarzwald und der Oberrheinischen Tiefebene dargestellt (Bezugszeitraum: 1897-1995). Nur die ersten beiden Hauptkomponenten sind auf dem 5 %-Niveau signifikant. *PC1* erklärt 52.8 % und *PC2* erklärt 28.1 % der Gesamtvarianz. Die erste Hauptkomponente weist auf allen Variablen positive Ladungen auf. Auf den Variablen Bu-KS2 und Bu-KW1 sind die Ladungen am geringsten. Wie bei den Fichtenchronologien (Abb. 3-2-6) ist die zweite Hauptkomponente polar ausgeprägt und trennt die Chronologien nach der Höhenlage des betreffenden Standorts: die Faktorladungen auf den Chronologien von Hochlagenstandorten weisen negative, auf den Vergleichschronologien aus der kollinen Höhenstufe positive Vorzeichen auf. Keine der dargestellten Hauptkomponenten trägt signifikant zu einer expositionsbezogenen Varianzaufspaltung bei.

In Abbildung 3-2-8 sind die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse von jeweils zwei nach der Exposition des Standorts stratifizierten Fichten-, Tannen- und Buchen-Radialzuwachschronologien aus der montanen Höhenstufe des Südschwarzwalds dargestellt (Bezugszeitraum: 1868-1995). Die Untersuchungsbäume stammen jeweils aus denselben beiden Beständen. Nur die ersten beiden Hauptkomponenten sind auf dem 5 %-Niveau signifikant. *PC1* erklärt 56.8 % und *PC2* erklärt 17.2 % der Gesamtvarianz. Die erste Hauptkomponente weist auf allen Variablen hohe positive Ladungen auf. Die zweite Hauptkomponente trennt die beiden Nadelbaumchronologien (negative Ladung) von der Buchenchronologie (positive Ladung).

Damit zeigt sich, daß die Radialzuwächse der hier dargestellten Fichten-, Tannen- und Buchenchronologien durch einen gemeinsamen Einflußfaktor (*PC1*) synchronisiert sind, demgegenüber art- und standortbezogene Muster in den Radialzuwachsreaktionen deutlich zurücktreten.

3.2.2 Vergleich des Höhenwachstums von Fichten und Tannen auf ausgewählten Standorten des Südschwarzwalds und der Oberrheinischen Tiefebene

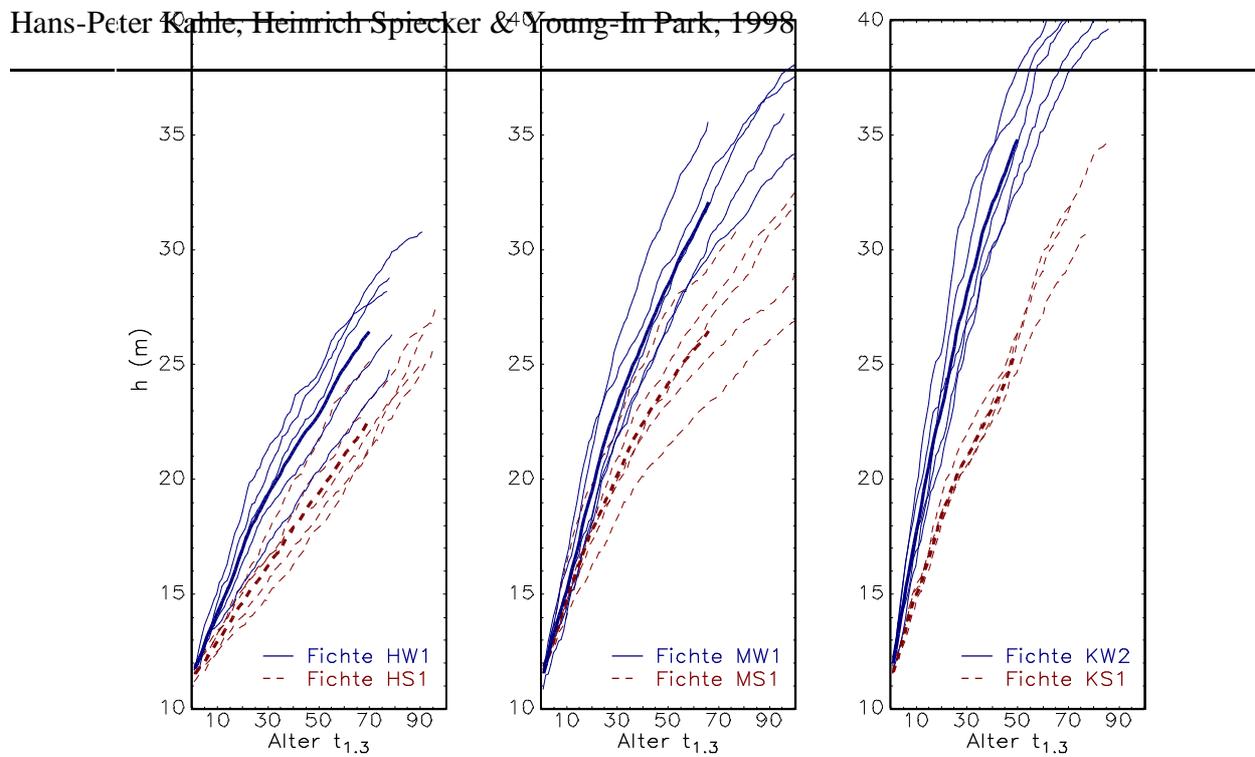
Tabelle 3-2-4 zeigt die mittleren Baumhöhen der untersuchten Fichten und Tannen aus dem Gebiet des Südschwarzwalds in den Altern 60, 80 und 100 Jahre. Sowohl bei den untersuchten Fichten als auch bei den untersuchten Tannen nehmen die Höhenbonitäten von den Hochlagen zur kollinen Höhenstufe zu. Im Kaiserstuhl (Fi-KK3 bzw. Ta-KK1) werden jedoch wieder geringere Höhenbonitäten erreicht. Regelmäßig sind in allen drei dargestellten Altern die Untersuchungsbäume von Winterhangstandorten höher als die Vergleichsbäume von Sommerhangstandorten.

Tabelle 3-2-4: Mittlere altersbezogene Baumhöhen der untersuchten Fichten und Tannen aus dem Gebiet des Südschwarzwalds.

ID	Mittlere Baumhöhe im $t_{1,3}$ -Alter					
	60		80		100	
	h (m)	n*	h (m)	n*	h (m)	n*
Fi-HS1	13.96	5	17.04	5	20.33	5
Fi-HW1	17.01	5	21.20	5	24.75	5
Fi-MS1	21.14	5	24.81	5	27.54	5
Fi-MW1	26.51	5	31.21	5	34.33	4
Fi-KS1	20.20	4	24.87	4	30.27	3
Fi-KW2	32.91	5	38.42	5	40.67	3
Fi-KK3	28.68	5	32.76	5	-	-
Ta-MS1	13.66	4	17.69	5	22.03	5
Ta-MW1	19.09	4	24.45	4	28.80	4
Ta-SS1	20.51	5	23.78	5	26.71	5
Ta-KS2	23.40	5	26.76	5	29.93	4
Ta-KW2	32.12	5	37.62	5	38.86	1
Ta-KK1	27.16	5	-	-	-	-

* Die Anzahl der jeweils zugrundeliegenden Beobachtungen (n) schwankt, da zum einen nicht alle Bäume das entsprechende Alter erreicht haben, zum anderen weil bei einzelnen Bäumen in dem entsprechenden Alter keine Höhenanalyse möglich war (z.B. bedingt durch Schäden an der Krone durch den Fällvorgang).

Bezogen auf die Alter 60 und 80 Jahre werden bei den untersuchten Fichten mit zunehmender Meereshöhe die expositionsbedingten relativen Höhenbonitätsunterschiede geringer. In den Abbildungen 3-2-9 und 3-2-10 ist das Höhenwachstum der untersuchten Fichten und Tannen graphisch über dem Alter in Brusthöhe dargestellt (nur solche Kollektive sind dargestellt, für die ein Vergleich von Bäumen verschieden exponierter Standorte in derselben Höhenlage möglich ist). Sowohl bei den Fichten als auch bei den Tannen ist die Krümmung der Höhenwachstumskurven bei den Bäumen von Sommerhangstandorten größer.

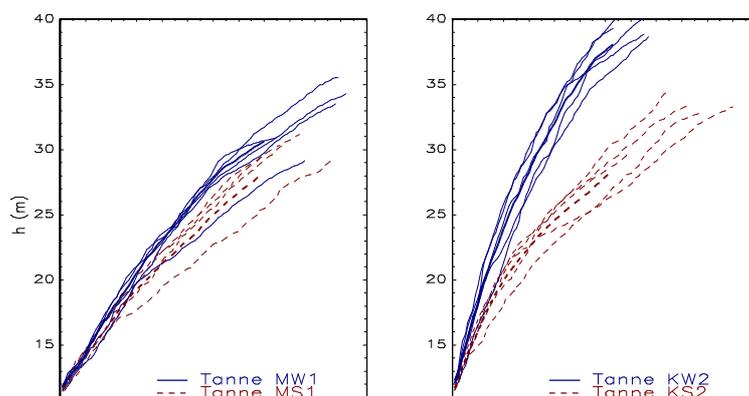


3.2.3 Vergleich der interannuellen Wachstumsreaktionen von Fichten und Tannen auf einer mäßig frischen, einer wechselfeuchten und einer vernässenden Standortseinheit im Oberen Buntsandstein des Flächenschwarzwalds

In Tabelle 3-2-5 werden die Untersuchungsbaumkollektive aus dem Forstbezirk Bad Liebenzell anhand waldwachstumskundlicher Kenngrößen charakterisiert. Die Tannen der mäßig frischen (mfr) und wechselfeuchten (wf) Einheit sind älter und weisen auch eine größere Altersspreitung auf als die Fichten. Auf allen drei Standorten sind die Fichten bei gleichem Brusthöhenalter ($t_{1,3}$ -Alter) höher als die Tannen, wobei bei beiden Baumarten die Höhenwuchsleistung zum vernässenden (vn) Standort hin abnimmt. Im Alter 50 sind die Tannen im Mittel dicker als die Fichten, während im Alter 80 die Fichten auf der mfr- und wf-Einheit deutlich größere Durchmesser aufweisen als die Tannen-Vergleichskollektive.

Tabelle 3-2-5: Waldwachstumskundliche Kenngrößen der Untersuchungsbaumkollektive aus dem Forstbezirk Bad Liebenzell.

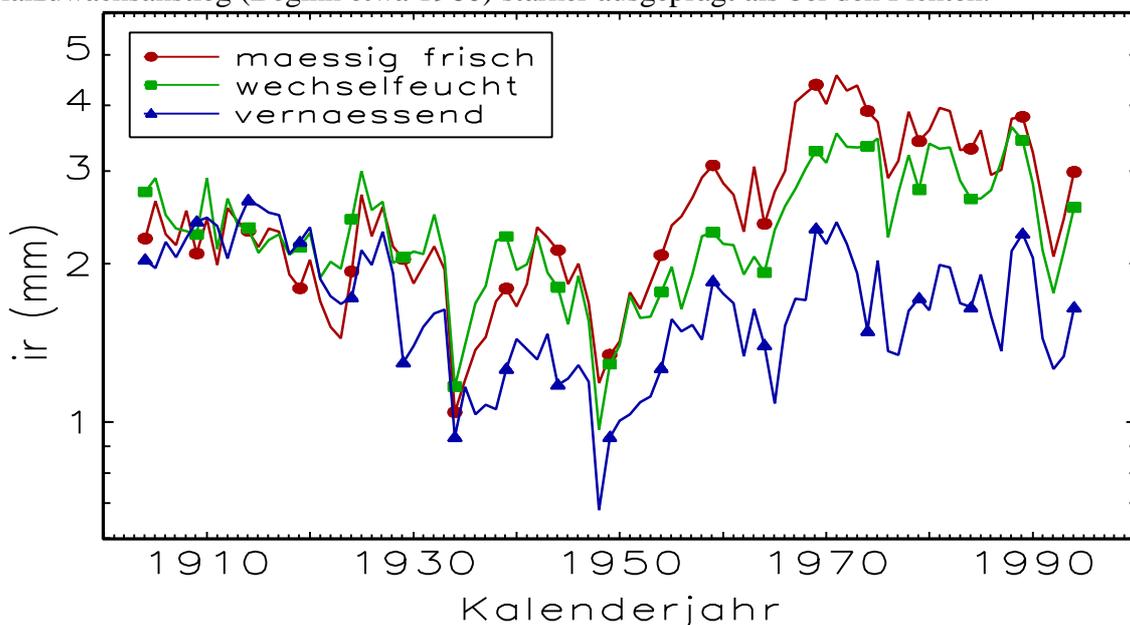
Kollektiv	Alter 1995	Höhe im Alter 80	Durchmesser	
	Spannweite u. Mittelwert		im Alter 50	im Alter 80
	a	m	cm	cm
Fi-MF*	85-93/89	28.8	19.7	40.7
Fi-WF*	83-92/87	27.4	20.0	37.3

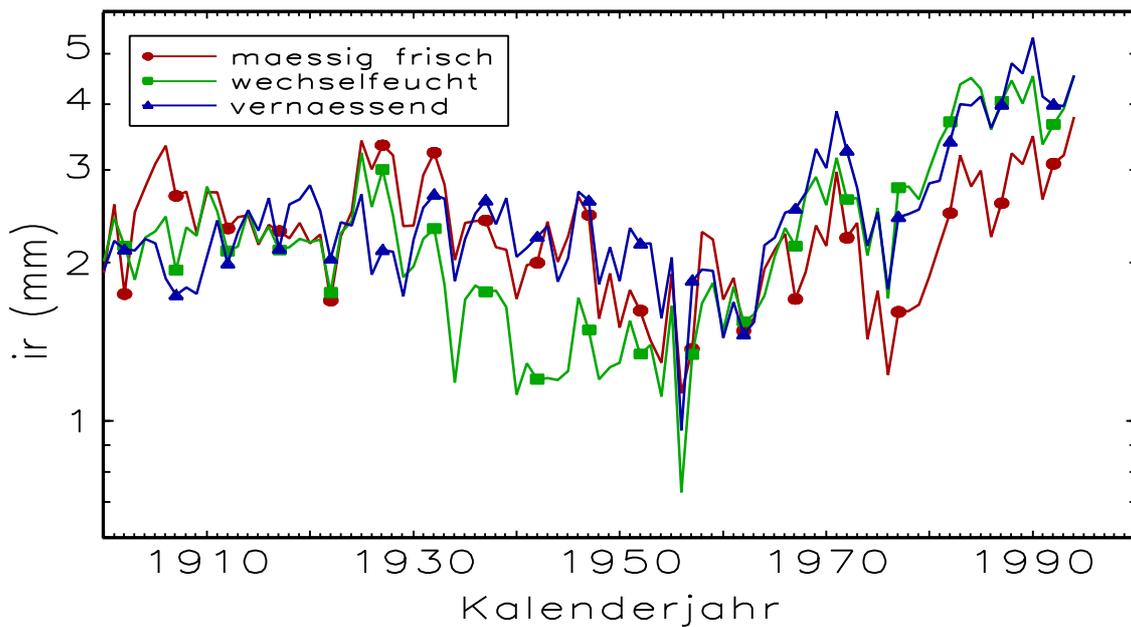


Fi-VN*	118-127/123	24.1	19.4	27.4
Ta-MF	95-112/103	24.6	22.9	33.5
Ta-WF	94-109/98	23.8	20.5	31.8
Ta-VN	71-122/97	21.3	23.3	40.2

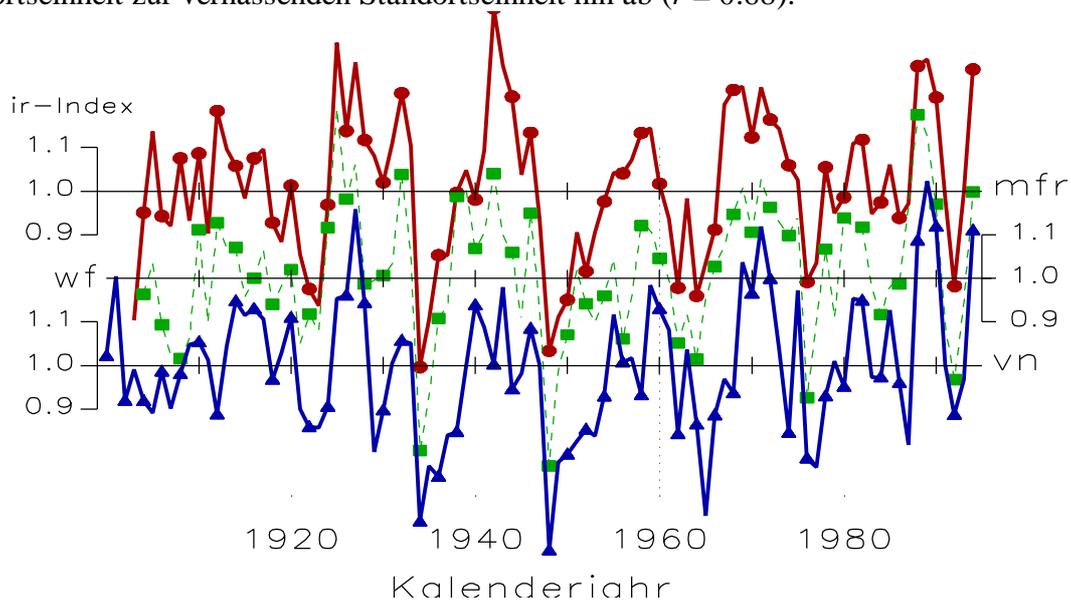
* Wasserhaushaltsstufen: MF: mäßig frisch, WF: wechselfeucht, VN: vernässend.

Der Verlauf der mittleren Radialzuwachsreihen der drei Fichtenkollektive ist in Abbildung 3-2-11 dargestellt. Während sich die Radialzuwachsreihen in den ersten Jahrzehnten im mittleren Zuwachsniveau kaum unterschieden, ist etwa ab 1930 eine Differenzierung in die Standortkollektive festzustellen: die Fichten der mäßig frischen Standortseinheit weisen im Mittel die höchsten, die Fichten der vernässenden Misse im Mittel die geringsten Radialzuwächse auf. Unabhängig vom dem unterschiedlichen Zuwachsniveau weisen die Kurven jedoch auch in dieser Zeit eine große Ähnlichkeit auf (die mittlere Gleichläufigkeit (GL) im Zeitraum 1904 bis 1994 beträgt 71 %). Seit Mitte der 50er Jahre ist bei allen Kollektiven eine Zunahme der mittleren jährlichen Radialzuwächse festzustellen. Die Radialzuwächse der Tannenkollektive verlaufen über mehrere Jahrzehnte auf annähernd gleichem Niveau (Abb. 3-2-12). Eine Differenzierung in die Standortkollektive ist nicht zu erkennen (GL: 85%), jedoch ist bei den Tannen der bis in die jüngste Zeit anhaltende Radialzuwachsanstieg (Beginn etwa 1960) stärker ausgeprägt als bei den Fichten.





Die trendbereinigten Radialzuwachsindexwerte der Fichtenkollektive sind in Abbildung 3-2-13 dargestellt. Die mittlere Interserienkorrelation verdeutlicht die große Ähnlichkeit zwischen den Chronologien, sie nimmt von $r = 0.85$ zwischen der mäßig frischen und der wechselfeuchten Standortseinheit zur vernässenden Standortseinheit hin ab ($r = 0.68$).



Allen Fichtenchronologien gemeinsame, negative Weiserjahre im Zeitraum 1910 bis 1994 sind in den Jahren 1934, 1948, 1976 und 1992 festzustellen. In den Jahren 1958, 1965, 1977 und 1987 treten markante Gegenläufigkeiten zwischen der Radialzuwachschronologie der Fichten der vernässenden Standortseinheit und den Vergleichschronologien auf. Negative Weiserjahre der Tannenchronologien sind die Jahre 1929, 1934, 1956 und 1976. Gegenläufigkeiten sind weniger auffällig als bei den Fichten.

Aus Tabelle 3-2-6 wird deutlich, daß die Kollektive der mäßig frischen und wechselfeuchten Standortseinheit für beide Baumarten homogener sind als das Vergleichskollektiv. Tendenziell sind

zeitlich übergreifende Zusammenhänge in den Radialzuwachschronologien der Fichten der mäßig frischen Standortseinheit stärker ausgeprägt als bei den Fichten der Vergleichsstandorte, während die Fichten der vernässenden Standortseinheit tendenziell eine größere Sensitivität aufweisen. Diese Unterschiede sind bei den Tannen weniger stark ausgeprägt.

Tabelle 3-2-6: Statistische Kenngrößen der Radialzuwachschronologien aus dem Forstbezirk Bad Liebenzell bezogen auf den Zeitraum 1900 bis 1994.

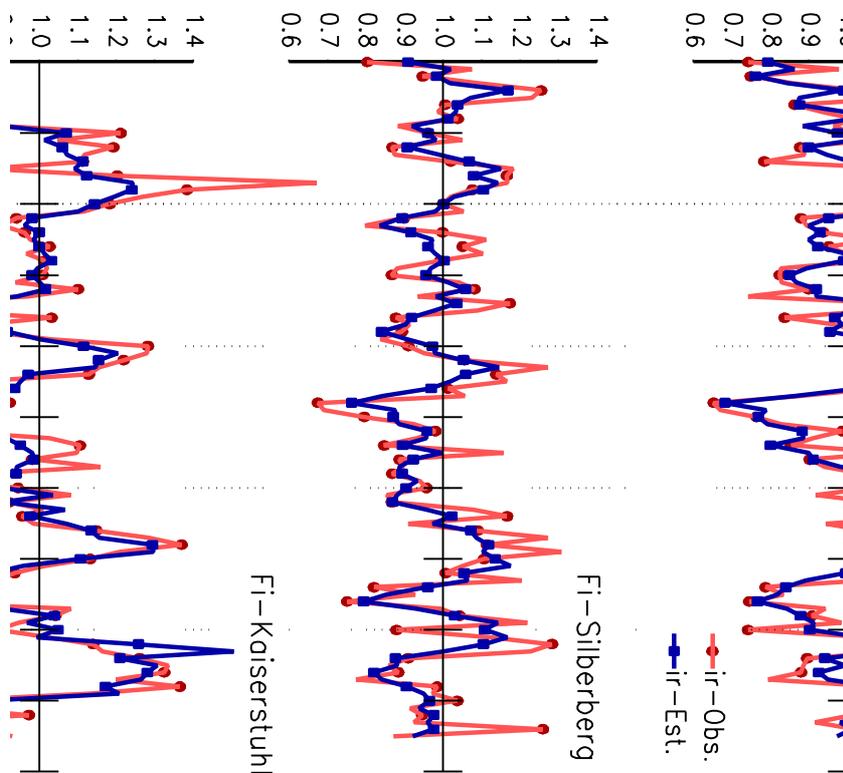
Kollektiv	Korrelation mit Referenz*	Autokorrelation Lag 1**	Mittlere Sensitivität
Fi-MF	0.72	0.55	0.155
Fi WF	0.73	0.47	0.160
Fi VN	0.68	0.49	0.180
Ta-MF	0.80	0.51	0.185
Ta-WF	0.83	0.30	0.177
Ta-VN	0.64	0.53	0.185

* Referenz ist die jeweils aus den Radialzuwachsindexreihen aller anderen Bäume im Bezugskollektiv gebildete Radialzuwachschronologie. Angegeben sind die Mittelwerte des Pearson'schen (Kreuz-) Korrelationskoeffizienten, r_{xy} , mit $v = 95-2$ FG (alle Werte sind signifikant, $\{\text{Prob} > |r_{xy}| \} \leq 0.0001$).

** Mittelwerte der Autokorrelationskoeffizienten, f_p , zu Lag $p = 1$, mit $v = 95-3$ FG (alle Werte sind signifikant, $\{\text{Prob} > |f_p| \} \leq 0.0001$).

3.2.4 Zusammenhänge zwischen der Variation von Klima und Witterung und den inter-annuellen Radialzuwachsreaktionen von Fichten auf ausgewählten Standorten des Südschwarzwalds und der Oberrheinischen Tiefebene

Auf der Grundlage der in KAHLE (1994) und KAHLE & SPIECKER (1996) beschriebenen Methodik wurden die Zusammenhänge zwischen der klimatischen Wasserbilanz, als Ausdruck für die Wasserversorgung, sowie der potentiellen Evapotranspiration, als Ausdruck für den atmosphärischen Verdunstungsanspruch, und den Radialzuwachsreaktionen ausgewählter Untersuchungsbaumkollektive analysiert. In Abbildung 3-2-14 sind für drei Fichten-Kollektive die Modellschätzwerte den Beobachtungswerten gegenübergestellt.



In die Modelle wurden die nach statistischen Kriterien (Allregs-Variablenselektion, VAN DEUSEN 1992) und fachwissenschaftlichen Gesichtspunkten ausgewählten und in Tabelle 3-2-7 dargestellten Variablen einbezogen.

Es zeigte sich, daß auf allen hier dargestellten Standorten hohe atmosphärische Verdunstungsanforderungen in den Monaten April bis Juni der Vorjahre sich signifikant hemmend auf den Radialzuwachs der Fichten auswirken (vgl. KAHLE 1994). Dabei sind die Zusammenhänge konstant über den gesamten Untersuchungszeitraum. Das Wärmeangebot in den Monaten Mai bis September des laufenden Jahres weist dagegen auf dem Sommerhangstandort (Feldberg), und das Wärmeangebot in der frühen Wachstumsphase (April bis Juni) auf dem Winterhangstandort (Silberberg), allerdings nur in einzelnen Jahren innerhalb der Untersuchungsperiode, einen signifikant positiven Zusammenhang zu den Radialzuwachsen auf. Die Fichten im Untersuchungsgebiet Kaiserstuhl zeigen sowohl gegenüber den Schwankungen der Wasserbilanz in den Monaten April bis August des laufenden Jahres, als auch gegenüber den Wasserbilanzschwankungen in den Monaten Juli bis Oktober der Vorjahre eine seit Beginn des Jahrhunderts ansteigende, signifikante Sensitivität. Auch in den Hochlagen sind die Radialzuwächse der untersuchten Fichten direkt und eng an die Wasserbilanzschwankungen in den Hochsommermonaten der Vorjahre gekoppelt.

Tabelle 3-2-7: Prädiktorvariablen für die Klima-Zuwachs Modelle.

Kollektiv	Variablen			
	ohne Zeitverschiebung		mit Zeitverschiebung (1 Jahr)	
Feldberg	-	<i>etp0509</i> *	<i>r5whn0708</i> **	<i>r5etp0406</i>
Silberberg	-	<i>etp0406</i>	<i>r5wbp0708</i>	<i>r5etp0406</i>
Kaiserstuhl	<i>wbp0408</i>	-	<i>r5wbp0710</i>	<i>r5etp0406</i>

* etp: potentielle Evapotranspiration (z.B.: *etp0509*: Summe der potentiellen Evapotranspiration Mai-September)

** wbp: klimatische Wasserbilanz, r5: asymmetrisches 5-jähriges gleitendes Mittel (z.B.: *r5wbp0708*: 5-jähriges gleitendes Mittel der Summen der klimatischen Wasserbilanzen von Juli bis August).

Tabelle 3-2-8 enthält einige Teststatistiken zur Prüfung der Signifikanz der Schätzung und der Verteilungsannahmen bezüglich der Residuen, und damit zur Prüfung der Angepaßtheit der Modelle an die Beobachtungswerte. Die *MVNR*-Statistiken liegen innerhalb der 95%-Vertrauensbereiche, und die $P(C^*)$ -Werte erreichen akzeptable Beträge. Bei der angegebenen Anzahl an Freiheitsgraden sind alle Modelle hochsignifikant. Die hohen multiplen Bestimmtheitsmaße belegen die gute Übereinstimmung zwischen Beobachtungs- und Modellschätzwerten (vgl. Abb. 3-2-14).

Tabelle 3-2-8: Diagnostische Teststatistiken für die zeitvariablen Klima-Zuwachs Modelle.

Kollektiv	<i>MVNR</i> *	<i>MVNR</i> 95% Intervall		C^* †	$P(C^*)$	R^2 ‡	FG	AIC_c §
Feldberg	1.673	1.581	2.419	0.343	0.733	0.71	90	-242.2
Silberberg	1.792	1.581	2.419	0.650	0.517	0.56	90	-210.3
Kaiserstuhl	1.896	1.564	2.436	-0.543	0.589	0.70	83	-159.7

* *MVNR* : Modifiziertes Von Neumann Verhältnis (HARVEY 1989, VAN DEUSEN 1990). Das 95% *MVNR* Vertrauensintervall gibt die kritischen Grenzen an, innerhalb derer die Modellanpassung unter formalen Gesichtspunkten akzeptabel ist.

† Der C^* -Test basiert auf der Summe der standardisierten Residuen. Hinweise auf evtl. Fehlspezifizierungen des Modells sind gegeben, wenn die Wahrscheinlichkeit für einen größeren absoluten Wert von C^* , $P(C^*)$, gering ist.

‡ Die R^2 Statistik ist analog dem multiplen Bestimmtheitsmaß der gewöhnlichen Kleinst-Quadrate-Schätzung (VAN DEUSEN 1990).

§ AIC_c ist das modifizierte Akaike Informationskriterium (VAN DEUSEN 1990).

3.3 Zellstrukturanalyse

Zellstrukturmerkmale wurden auf Stammquerschnittsflächen von jeweils drei ausgewählten Fichten vom Standort Schluchsee und vom Standort Kaiserstuhl analysiert. Für jeden Jahrring wurden der Nord- und Süd-Radius gemessen und analysiert, um einen Einblick in die Variationen innerhalb eines Jahrrings zu erhalten. Entlang der Meßradien wurden alle Jahrringe, vom Mark bis zum äußersten Jahrring vermessen. Bei den Bäumen aus dem Untersuchungsgebiet Schluchsee waren dies 60 Jahrringe (1933-1992), bei denen aus dem Gebiet Kaiserstuhl 93 Jahrringe (1903-1995). Den Auswertungen liegen Daten von insgesamt ca. 291.000 Zellen zugrunde.

3.3.1 Interannuelle Analyse

Tabelle 3-3-1 gibt anhand statistischer Kennwerte einen Überblick über die Zelldaten je Jahrring.

Tabelle 3-3-1: Deskriptive statistische Kenngrößen zu den Zellstrukturmerkmalen.

		Median	Mean	S.E	C.V.	MAX	MIN	S_m^*
Schluchsee								
Zellanzahl (ZA)	(n)	97.36	94.77	4.097	33.49	155.35	44.29	0.109
Zelldurchmesser (ZD)	(μ)	35.73	33.95	0.586	13.38	39.79	20.55	0.039
Lumendurchmesser (ZL)	(μ)	30.54	29.62	0.558	14.60	35.38	16.74	0.047
Zellwanddicke (ZW)	(μ)	4.31	4.33	0.057	10.13	5.42	3.33	0.047
Spätholzanteil (SH)	(%)	10.36	11.73	0.761	50.24	28.12	0.82	0.379
Kaiserstuhl								
Zellanzahl (ZA)	(n)	92.71	95.26	3.481	35.24	210.50	32.83	0.176
Zelldurchmesser (ZD)	(μ)	32.75	31.71	0.370	11.25	36.37	18.93	0.041
Lumendurchmesser (ZL)	(μ)	26.76	25.97	0.300	11.14	29.77	15.03	0.062
Zellwanddicke (ZW)	(μ)	6.33	5.74	0.146	24.43	8.10	2.54	0.073
Spätholzanteil (SH)	(%)	25.14	22.92	1.082	45.53	48.68	2.50	0.238

* S_m : Mittlere Sensitivität.

Die arithmetischen Mittelwerte von Zellanzahl und Zelldurchmesser je Jahrring der untersuchten Fichten vom Standort Schluchsee betragen 95 ± 4.1 bzw. $34 \mu \pm 0.6 \mu$. Im Vergleich zum Kaiserstuhl sind beide Mittelwerte größer, variieren aber weniger stark jedes Jahr. Demgegenüber sind Zellwanddicke und Spätholzanteil der Fichten vom Standort Kaiserstuhl deutlich größer als in Schluchsee. So ist die Zellwanddicke um ca. $2/3$ größer als in Schluchsee und schwankt auch stärker. Bei der jährlichen Betrachtung weisen alle Parameter der Untersuchungsbäume aus dem Kaiserstuhl, abgesehen vom Spätholzanteil, eine größere mittlere Sensitivität auf.

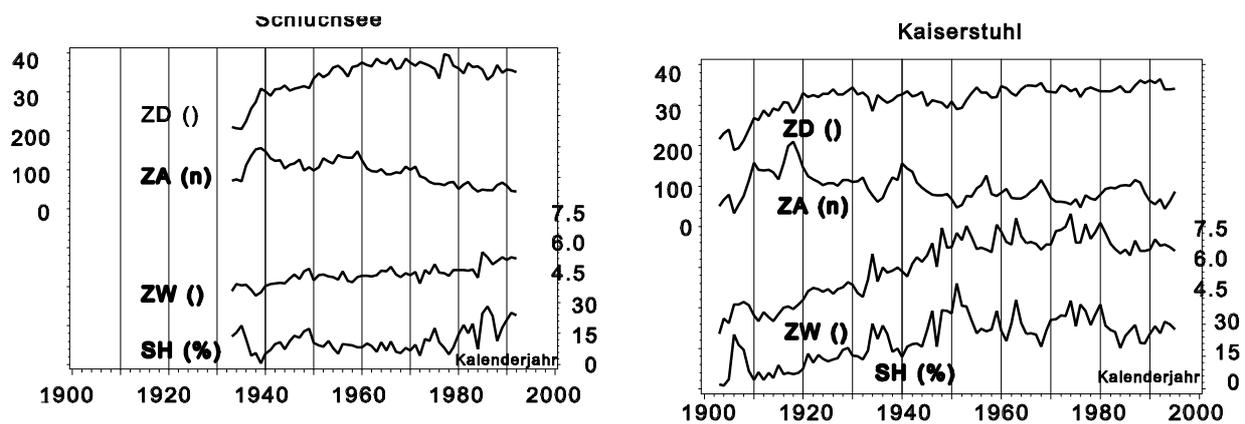


Abbildung 3-3-1: Jährliche Verläufe verschiedener Zellparameter der Fichten aus den Untersuchungsgebieten Schluchsee und Kaiserstuhl (Erläuterung der Abkürzungen siehe Tab. 3-3-1).

Bezogen auf dieselben Zellparameter zeigen die Untersuchungsbäume beider Standorte die gleichen langfristigen Entwicklungstendenzen: mit zunehmendem Alter nimmt die Zellanzahl ab, demgegenüber steigen die Parameter Zelldurchmesser, Zellwanddicke und Spätholzanteil mit zunehmendem Alter an (Abb. 3-3-1)(vgl. Larson, 1973). Auffallend ist, daß dem starken Abfall der Zelldurchmesser im Jahr 1976 ein starker Anstieg im Jahr 1977 folgt. Im Zeitraum 1986 bis 1991 ist auf beiden Standorten ein synchroner Verlauf zu beobachten.

Zusammenhänge zwischen Radialzuwachs und Zellstruktur

Bei der Korrelationsanalyse der jährlichen Mittelwerte aller untersuchten Parameter zeigt sich (vgl. Tab. 3-3-2), daß der Radialzuwachs mit allen Parametern außer dem Zelldurchmesser straff zusammenhängt. Mit der Zellanzahl beträgt der Korrelationskoeffizient in beiden Fällen mehr als 0.9, d.h, die Variation des Radialzuwachses läßt sich weitgehend über die Dynamik der Zellanzahl erklären (Fritts, 1976). Der Radialzuwachs ist negativ mit dem Spätholzanteil und der Zellwanddicke korreliert. Zwischen den Zellparametern bestehen mit wenigen Ausnahmen enge Zusammenhänge.

Tabelle 3-3-2: Korrelationsanalyse zwischen Radialzuwachs und Zellparametern.

	IR	ZA	ZD	ZL	ZW	SH
Schluchsee						
IR		0.90**	0.16	0.21	-0.45**	-0.67**

ZA	0.93**		-0.21	-0.15	-0.66**	-0.64**
ZD	0.17	0.00		0.99**	0.54**	-0.11
ZL	0.40**	0.26*	0.93**		0.46**	-0.18
ZW	-0.39**	-0.53**	0.63**	0.29**		0.69**
SH	-0.57**	-0.66**	0.38**	0.03	0.91**	
Kaiserstuhl						

* signifikant auf 5% Niveau

** signifikant auf 1% Niveau

IR: Radialzuwachs, ZA: Zellanzahl, ZD: Zelldurchmesser, ZL: Zellumendurchmesser, ZW: Zellwanddicke, SH : Spätholzanteil.

Varianzanalyse

Zur Untersuchung der Frage, ob es Unterschiede zwischen den Bäumen der beiden Standorte, zwischen den Bäumen eines Standorts, oder innerhalb eines Baums zwischen dem Nord- und Südradius gibt, wurde eine Varianzanalyse mit 'Three-Level-Nested Design' durchgeführt. Die berechneten Varianzkomponenten sind in Tabelle 3-3-3 aufgelistet. Bei allen Parametern sind hochsignifikante Unterschiede zwischen den Standorten, den Bäumen, dem Alter und der Exposition zu finden. Beim Zellumendurchmesser ist die Varianzkomponente 'Exposition' nur auf dem 5%-Niveau signifikant.

Beim Alter (*RING*) zeigt sich der höchste Anteil der gesamten Variation in allen Parametern. Demgegenüber sind die Variationen zwischen den Expositionen am geringsten bei allen Parametern.

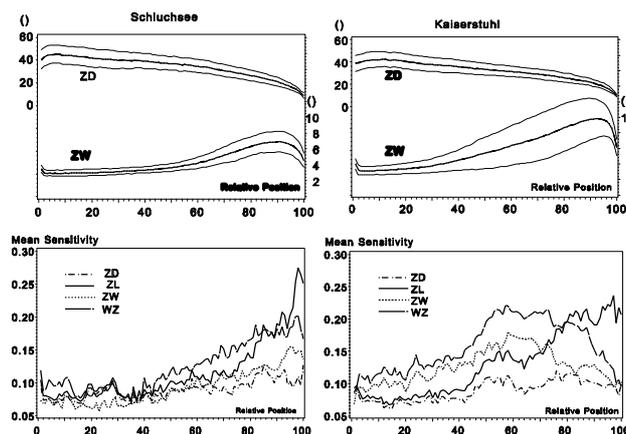
Tabelle 3-3-3: Varianzen und Varianzanteile.

Source	E.M.S	Pr > F	Variance Components	Contribution (%)
ZELL				
SITE	33925.338	0.0001	1.81	1.68
TREE	9808.19	0.0001	1.90	1.77
RING	837.52	0.0001	11.10	10.31
EXPOSITION	126.97	0.0001	1.07	0.99
ERROR	91.72		91.72	85.24
TOTAL			107.59	100.00
LUMEN				
SITE	98187.489	0.0001	6.76	4.59
TREE	6966.52	0.0001	1.33	0.90
RING	717.61	0.0001	8.93	6.06
EXPOSITION	146.05	0.0406	0.49	0.33
ERROR	129.77		129.77	88.11
TOTAL			147.28	100.00

Source	E.M.S	Pr > F	Variance Components	Contribution (%)
WAND				
SITE	16206.540	0.0001	1.05	12.73
TREE	2129.01	0.0001	0.44	5.29
RING	78.39	0.0001	1.07	13.05
EXPOSITION	9.63	0.0001	0.12	1.51
ERROR	5.55		5.55	67.42
TOTAL			8.23	100.00

Die relativ niedrigen Varianzanteile zwischen den Bäumen (*TREE*) bei allen Parametern geben Hinweise darauf, daß die Variation innerhalb eines Baumes größer ist als die zwischen den Bäumen, und der Fehler-Term deutet an, daß sich der größte Anteil der Dynamik in der Variation innerhalb eines Jahrrings befindet.

3.3.2 Intraannuelle Analyse



Da die Zellanzahl sowohl zwischen den Bäumen als auch innerhalb eines Baumes, ja sogar zwischen den Zellreihen innerhalb eines Jahrrings beträchtlich schwankt, wurden die Sequenzen aller untersuchten Zellparameter in relative Positionen bezüglich der Zellanzahl umgesetzt, um die Parameter miteinander vergleichbar zu machen (Abb. 3-3-2). Wie in Tabelle 3-3-1 gezeigt, ist der Zelldurchmesser bei den Bäumen vom Standort Schluchsee größer als der bei den Bäumen vom Standort Kaiserstuhl. Dies trifft auch bei Berücksichtigung des unterschiedlichen Alters zu. Bei Betrachtung der intraannuellen Struktur wird deutlich, daß insbesondere die Durchmesser der Frühholzzellen größer sind, und daß diese zwischen den Jahren stärker variieren als am Standort Kaiserstuhl. Demgegenüber sind die Zellwanddicken der Spätholzzellen (nach der Definition von Mork, 1928) der Bäume vom Standort Kaiserstuhl, auch unter Berücksichtigung des unterschiedlichen Alters, wesentlich dicker als jene in Schluchsee, und die Streuung ist schon ab 20% der relativen Position größer als die in Schluchsee (Abb. 3-3-2).

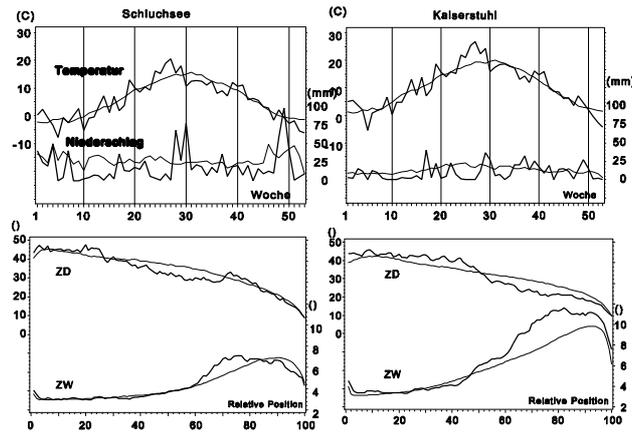
In der unteren Hälfte von Abbildung 3-3-2 ist die mittlere Sensitivität ausgewählter Parameter über der relativen Position innerhalb des Jahrrings dargestellt. Bei dem Untersuchungsmaterial vom

Standort Schluchsee sind allmähliche Anstiege aller Parameter festzustellen. Auffällig ist die sprunghaft ansteigende Sensitivität des Zellwanddurchmessers ab der 92. relativen Position. Im mittleren Bereich der Jahrringe zeigen die Zellparameter der Bäume aus dem Kaiserstuhl ein sensitiveres Verhalten als in anderen Jahrringbereichen und auch als die Bäume vom Standort Schluchsee. Bei beiden Standorten zeigt der Zelldurchmesser die geringste Sensitivität.

3.3.3 Zusammenhänge zwischen Klima und Zellparametern

Es wurde eine Kreuzkorrelationsanalyse zwischen den wöchentlichen Klimaparametern maximale, minimale und mittlere Lufttemperatur (für den Standort Schluchsee nur mittlere Lufttemperatur), Niederschlag, Luftfeuchte, Sonnenscheindauer, Windgeschwindigkeit und den Zellparametern aller relativen Positionen innerhalb der Jahrringe durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, daß jeder Abschnitt innerhalb eines Jahrrings auf verschiedene klimatische Phänomene auf eigene Weise reagiert. Beispielsweise konnte eine signifikant positive Korrelation zwischen der Lufttemperatur in der 27. Woche und den Zellwanddicken von der 69. bis zur 89. relativen Position der Fichten vom Standort Schluchsee festgestellt werden. Am Material vom Standort Kaiserstuhl wurden signifikant negative Korrelationen zwischen allen Lufttemperaturparametern in der gleichen Woche und den Zelldurchmessern von der 52. bis zur 80. relativen Position gefunden. Der Niederschlag ist mit den Zelldurchmessern der Untersuchungsbäume von beiden Standorten von der 53. bis zur 65. relativen Position positiv korreliert.

Am Beispiel des Jahres 1976 werden in Abbildung 3-3-3 die Verläufe der Zellparameter zusammen mit den wöchentlichen Mittelwerten von Lufttemperatur und Niederschlag für die Untersuchungsgebiete Schluchsee und Kaiserstuhl dargestellt. Das Jahr 1976 ist charakterisiert durch eine ausgeprägte fröhsummerliche Trockenperiode. Wie aus der Darstellung hervorgeht, ist die Lufttemperatur von der 24. bis zur 29. Woche in beiden Untersuchungsgebieten sehr hoch im Vergleich zum langfristigen Mittelwert. Gleichzeitig ist die Zellwanddicke am Ende des Frühholzes und am Anfang der Spätholzzellen bei den Fichten beider Standorte überdurchschnittlich groß, nimmt dann aber während der Periode niedrigerer Lufttemperaturen bis zur 38. Woche noch einmal ab. Ein besonders starker Rückgang ist in Schluchsee zu beobachten. Vergleicht man demgegenüber den Niederschlag und den Zelldurchmesser, ist zu vermuten, daß der niedrigere Niederschlag im Jahr 1976 den geringeren Durchmesser sowohl in den Übergangs- (in beiden Standortkollektiven) als auch in den Spätholzzellen (bei den Untersuchungsbäumen aus dem Kaiserstuhl) verursacht hat. Ferner scheint sich der Zelldurchmesser der Fichten vom Standort Schluchsee durch die höheren Niederschläge von der 28. bis zur 30. Woche zu erholen. Berücksichtigt man, daß sowohl der Zelldurchmesser als auch die Zellwanddicke im allgemeinen mit zunehmendem Alter zunehmen (vgl. Abb. 3-3-1), ging die Größe des Zelldurchmessers und der Zellwanddicke im Jahr 1976 insgesamt zurück.



Als Ursache für die beschriebene synchrone Beschleunigung des Radialzuwachses der Fichten und Tannen in jüngerer Zeit sind im wesentlichen zwei Faktoren denkbar: eine Veränderung der Konkurrenzverhältnisse und/oder eine Veränderung der Standortsproduktivität (SPIECKER *et al.* 1996). Die exakte Bestimmung der Ursache wird dadurch erschwert, daß es neben der Änderung der Standortverhältnisse auch andere Umwelteinflüsse gibt die das Dickenwachstum nachhaltig beeinflussen.

4. Diskussion

4.1 Diskussion des Untersuchungsmaterials

Wachstumsdaten

Repräsentativität der Untersuchungsbäume

Die Vorauswahl der Standorte für die Untersuchungsbaumentnahme wurde auf der Grundlage der Ergebnisse der Standortkartierung in enger Zusammenarbeit mit der Abteilung Standortkartierung der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg getroffen (vgl. Unterabschnitt 2.1). In den nach standortkundlichen Gesichtspunkten ausgewählten Beständen wurden dann die Untersuchungsbäume entsprechend des in Unterabschnitt 2.3 beschriebenen Verfahrens selektiert. Die Untersuchungsbäume wurden anschließend eingeschlagen und stammanalytisch erfaßt. Das angewendete Auswahlverfahren basiert nicht in allen Stufen auf dem Zufallsprinzip. Da ferner nicht angenommen werden kann, daß die Auswahlkriterien für die Untersuchungsbäume stochastisch unabhängig von den untersuchten Radialzuwachsreaktionen sind, können die ausgewählten Untersuchungsbäume nicht als repräsentative Zufallsstichproben für die Grundgesamtheiten aller Fichten auf den betreffenden Standortseinheiten angesehen werden. Vielmehr handelt es sich um selektierte, nicht-zufällige Stichproben (SACHS 1992 S. 98-100), deren Repräsentativität auf das Kollektiv, der durch dieselben Auswahlkriterien bestimmten Fichten der betreffenden Standortseinheiten beschränkt bleibt. Damit können die Ergebnisse streng genommen nur auf die durch beliebige Vermehrung der vorliegenden, stratifizierten Stichprobeneinheiten gedachten Grundgesamtheiten verallgemeinert werden.

Repräsentativität der Radialzuwachsdaten

Die jährlichen Radialzuwächse wurden auf Stammscheiben entlang von acht Meßradien gemessen (vgl. Unterabschnitt 2.1). Im Vergleich zu Zuwachsdaten, die anhand von Bohrkernen ermittelt werden, weisen diese eine größere Repräsentativität für den Radialzuwachs des Einzelbaumes auf.

Klimadaten

Für die vorliegende Untersuchung wurden Klimadaten vom Deutschen Wetterdienst zur Verfügung gestellt. Diese Datensätze sind nicht auf Repräsentativität und Homogenität geprüft. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden deshalb die Meßreihen auf Homogenität untersucht. Eine Überprüfung der Repräsentativität der meteorologischen Daten war im Rahmen dieser Untersuchung aufgrund fehlender Vergleichsmessungen in den Untersuchungsbeständen nicht möglich. Aus den homogenen klimatologischen Beobachtungsreihen wurden deshalb mit einem räumlichen Interpolationsverfahren Punktschätzungen der monatlichen Werte von Niederschlag und Lufttemperatur für die Untersuchungsbestände abgeleitet.

4.2 Diskussion von Forschungsansatz und Untersuchungsmethoden

Forschungsansatz

Die retrospektive Analyse der langfristigen Zuwachsreihen basiert auf einem modellorientierten, dendroökologischen Forschungsansatz. Der dendroökologische Forschungsansatz ist dadurch charakterisiert, daß datierte Jahrringe zur Untersuchung ökologischer Fragestellungen verwendet werden. Die Dendroökologie hat eine lange Tradition (siehe Rückblicke in FRITTS 1976 und SCHWEINGRUBER 1983 und 1993) und baut auf einem breiten methodischen Instrumentarium auf (vgl. COOK & KAIRIUKSTIS 1990).

Gegenüber dem wissenschaftlichen Experiment ist das kausalanalytische Potential dieses rein beobachtenden Ansatzes jedoch beschränkt (COCHRAN 1983). Dies resultiert im wesentlichen daraus, daß bei der retrospektiven Untersuchung nicht alle möglicherweise relevanten Randbedingungen konstant gehalten bzw. durch eine geeignete Versuchsanlage kontrolliert werden können und hat damit zur Folge, daß die Isolierung spezifischer Faktoreinflüsse sowie die quantitative Bestimmung der zugrundeliegenden Dosis-Wirkungsbeziehungen nur unter Einschränkungen möglich sind (COOK & CAMPBELL 1979, SACHS 1988).

Eine Folgerung aus den Ergebnissen zahlreicher einzel- und interdisziplinärer Untersuchungen zum Waldwachstum auf verschiedenen Integrationsstufen ist, daß eine befriedigende Interpretation aktueller Zustandsgrößen nur unter Berücksichtigung längerfristiger Zusammenhänge möglich ist. Solange nicht die für die Dynamik von Waldökosystemen charakteristischen zeitlichen Größenordnungen typischer Variationen erfaßt werden, behalten einzelne experimentelle Beobachtungen und Befunde, mögen sie auch noch so detailliert sein, den Charakter von Momentaufnahmen.

Für die standortbezogene Untersuchung klimabezogener Zuwachsreaktionen gibt es wegen der Langlebigkeit der Waldbäume und aufgrund der vernetzten Wechselbeziehungen in Waldökosystemen neben der ständigen Beobachtung des Wachstums und wachstumsrelevanter Umweltfaktoren kaum eine Alternative zum retrospektiven Forschungsansatz (TILMAN 1988). Durch eine geeignete Versuchsanlage sollen relevante Randbedingungen kontrolliert, und damit 'quasi-experimentelle' Voraussetzungen geschaffen werden, auf deren Grundlage zumindest fundierte Hypothesen über die tatsächlich zugrundeliegenden Ursache-Wirkungsbeziehungen abgeleitet werden können.

Versuchsanlage

Die Versuchsanlage kennzeichnet die Objektwahl, sie beschreibt die Zuordnungsvorschrift, die die Untersuchungsbaumkollektive (Versuchseinheiten) den verschiedenen Höhenlagen und Expositionen (Versuchsbedingungen) zuordnet (vgl. RASCH, GUIARD & NÜRNBERG, 1992). Bei der Untersuchung der Zusammenhänge zwischen der Variation von Klima und Witterung und den Radialzuwachsreaktionen unter Berücksichtigung von Lage und Relief stellen die durch Höhenlage und Exposition repräsentierten klimatologischen Wirkungskomplexe die Prüffaktoren dar.

Eine für die hier zu untersuchende Fragestellung geeignete Versuchsanlage basiert auf dem Konzept der Gradient-Analyse. Dieser Ansatz wurde in der Geobotanik bzw. Pflanzensoziologie entwickelt. WHITTAKER (1967) versuchte anhand von Feldtransekten das grundlegende experimentelle Prinzip der kontrollierten Veränderung eines Faktors bzw. Faktorkomplexes dessen Einfluß untersucht werden soll, unter Konstanzhaltung aller anderen Faktoren, auf pflanzensoziologische Freilanduntersuchungen zu übertragen (vgl. MUELLER-DOMBOIS & ELLENBERG 1974). Die Transektuntersuchung entlang ökologischer Gradienten stellt heute die wohl am weitesten verbreitete dendroökologische Strategie zur Objektwahl bei faktoranalytischer Zielsetzung dar.

4.3 Diskussion der Untersuchungsergebnisse

In allen hier dargestellten Gebieten und saisonalen Bezugsperioden ist ein tendenzieller Anstieg der mittleren Lufttemperaturen innerhalb des vergangenen über 100jährigen Zeitraums festzustellen (Abb. 3-1-3) (vgl. SCHÖNWIESE & RAPP 1997). Der Anstieg der mittleren Lufttemperaturen ist in den Hochlagen des Südschwarzwalds weniger stark ausgeprägt als in den Vergleichsgebieten. Die Anstiegsraten liegen beim Jahresmittel geringfügig unter den Anstiegsraten der Vegetationszeitmittelwerte. Maximale Anstiegsraten sind in den Hochsommermonaten zu verzeichnen. Hier werden im Kaiserstuhlgebiet im jüngsten Jahrzehnt extrem hohe Werte erreicht.

Langfristige Trends sind bei den Niederschlagssummen weniger stark ausgeprägt als bei den Lufttemperaturen (Abb. 3-1-4). Auffallend ist die Phase mit extrem geringen Niederschlägen Ende der 40er Jahre in den Hochlagen des Südschwarzwalds. In derselben Zeit sind die Niederschläge im Ostschwarzwald und in der Kaiserstuhlregion nur geringfügig reduziert. Große Unterschiede zwischen den einzelnen Bezugszeiträumen sind seit Anfang der 70er Jahre in den dargestellten Gebieten des Südschwarzwalds, und etwa seit 1980 im Kaiserstuhlgebiet zu beobachten. Hier scheren die Kurven der mittleren Niederschlagssummen in einer während des über 100jährigen Zeitraums noch nie in dieser Art beobachteten Weise auseinander. Überdurchschnittlich hohen Jahresniederschlagssummen stehen weit unterdurchschnittliche Niederschlagssummen in der Vegetationsperiode, insbesondere aber in den Hochsommermonaten gegenüber. Diese Verhältnisse spiegeln sich auch in der klimatischen Wasserbilanz wider (Abb. 3-1-5, 3-1-6, 3-1-7).

Beim Vergleich der Radialzuwachsreihen der Untersuchungsbaumkollektive lassen sich die folgenden Tendenzen erkennen (Tab. 3-2-2): Oberhalb der submontanen Höhenstufe sind die mittleren Radialzuwächse der Fichten, Tannen und Buchen von Standorten an Sommerhängen größer als die der Vergleichsbäume von Standorten an Winterhängen. In der kollinen Höhenstufe kehren sich die Verhältnisse um. Bei den untersuchten Fichten aus dem Flächenschwarzwald nehmen im Zeitraum 1934 bis 1993 die mittleren Radialzuwächse der Bäume von dem Missestandort (VN) zu denen der Bäume vom mäßig-frischen Standort (MF) hin zu, bei der Tanne ab.

Die Chronologien der untersuchten Fichten von SW-exponierten Sommerhängen weisen im Zeitraum 1934 bis 1993 eine größere Autokorrelationen zu *Lag 1* auf als die Vergleichschronologien von NE-exponierten Winterhängen (Tabelle 3-2-3). Bezüglich der mittleren Sensitivität sind bei den untersuchten Fichten keine klaren Zusammenhänge zur Höhenlage oder Exposition des Standorts zu erkennen. Während bei den untersuchten Tannen und Eichen die mittlere Sensitivität mit zunehmender Höhenlage abnimmt, nimmt sie bei den untersuchten Buchen von der submontanen zur hochmontanen Höhenstufe systematisch zu. Im Mittel beträgt die Sensitivität der Fichtenchronologien 0.175 . Mit einer mittleren Sensitivität von 0.219 reagieren die untersuchten Tannen

im Mittel sensitiver. Die stärkste Reaktion auf kurzfristig schwankende Umwelteinflüsse ist bei den Buchen mit einer mittleren Sensitivität von 0.302 festzustellen. Die Sensitivität der untersuchten Eichen ist auf allen Standorten geringer als die der untersuchten Buchen.

Im Vergleich zu den Laubbäumen wird der Radialzuwachsverlauf der Nadelbaumarten stark durch systematische Pendelungen und/oder Tendenzen geprägt, wie an den deutlich größeren Autokorrelationskoeffizienten zu erkennen ist.

In den Abbildungen 3-2-2 bis 3-2-5 sind die mittleren Radialzuwachsverläufe der Untersuchungsbaumkollektive über den Kalenderjahren dargestellt. Hier werden lang-, mittel- und kurzfristige Zuwachsschwankungen, sowie beim Vergleich zwischen den mittleren Radialzuwachsverläufen der verschiedenen Untersuchungsbaumkollektive, synchrone und standortspezifische Radialzuwachsreaktionen deutlich.

Die untersuchten Fichten von einem NE-exponierten Winterhang in der hochmontanen Höhenstufe des Südschwarzwalds (1330 m üNN) weisen, bezogen auf dasselbe Alter, im Mittel größere Höhen und größere Brusthöhendurchmesser auf als die Fichten des SW-exponierten Sommerhangs. Die Radialzuwachschronologien der untersuchten Buchen auf denselben Standorten zeigen eine deutlich größere Sensitivität und Standardabweichung als die Fichten. Beim Vergleich der Radialzuwachsreaktionen sind weder bei den Fichten noch bei den Buchen deutliche Unterschiede zwischen den Standortkollektiven festzustellen.

Mit der Hauptkomponentenanalyse der Radialzuwachschronologien der Fichten- und Buchenkollektive konnte gezeigt werden, daß der Standortfaktor Höhenlage einen stärker differenzierenden Einfluß auf die Radialzuwachsreaktionen ausübt als der Standortfaktor Exposition (Abb. 3-2-6, 3-2-7). Die gemeinsame multivariate Analyse der Radialzuwachschronologien von Fichten, Tannen und Buchen eines Winterhang- und eines Sommerhangstandorts ergab, daß die Chronologien durch einen gemeinsamen Einflußfaktor synchronisiert sind, demgegenüber art- und standortbezogene Muster in den Radialzuwachsreaktionen deutlich zurücktreten (Abb. 3-2-8).

Der Vergleich des Höhenwachstums von Fichten und Tannen auf ausgewählten Standorten des Südschwarzwalds und der Oberrheinischen Tiefebene ergab, daß die Höhenbonitäten von den Hochlagen zur kollinen Höhenstufe zunehmen. Im Kaiserstuhl werden jedoch wieder geringere Höhenbonitäten erreicht. Regelmäßig sind die Untersuchungsbäume von Winterhangstandorten bei gleichem Alter höher als die Vergleichsbäume von Sommerhangstandorten (Abb. 3-2-9 und 3-2-10).

Aus der Literatur sind einige, überwiegend ältere, waldwachstumskundliche Untersuchungen zu dem hier untersuchten Themenkomplex bekannt. Einige Ergebnisse sollen hier kurz besprochen werden.

CIESLAR (1907) fand bei der überwiegenden Anzahl der von ihm untersuchten Lärchen und Fichten aus Hochlagen in den Ostalpen (Meereshöhe ca. 1400 m üNN), daß diese im warm trockenen Jahr 1904 breitere Jahrringe anlegten als vorher. Auf den Südhängen in ähnlichen Meereshöhen in den Karawanken zeigte sich jedoch im selben Jahr, daß "unter dieser Ungunst der Standorte ... geringe Niederschläge und hohe Wärme selbst in Meereshöhen von 1000 bis 1500 m den Stärkezuwachs herabzudrücken" vermögen (CIESLAR 1907, S. 309).

Bei der Untersuchung der Wachstumsgänge von Fichten auf Versuchsflächen in montanen Lagen des

Südschwarzwalds (Höhenlage 1000 m üNN) fand WEIHE (1955), daß die am Südhang liegenden Flächen eine um eine halbe Stufe geringere Bonität aufweisen als die am Nordhang gelegenen Flächen. "Aus diesem Versuch scheint sich entnehmen zu lassen ... daß in dieser Höhenlage die Wärme noch nicht zu einem wachstumsentscheidenden Faktor geworden ist" (WEIHE 1955, S.38; vgl. auch OTT 1978). ".. Es läßt sich erkennen, daß auch noch in den Hochlagen das Wachstum mehr von den Niederschlagsmengen bestimmt wird als von der Wärme, denn die Flächen ... über 1100 m ..., weisen zur gleichen Zeit Zuwachshebungen und -senkungen auf, wie die tiefer gelegenen Versuchsflächen" (WEIHE 1955, S.47). Dieser Befund wird jedoch von KERN und MOLL (1960) nicht bestätigt.

MITSCHERLICH (1957) kommt in einer ähnlichen Untersuchung wie WEIHE (1955) im Hochschwarzwald zu folgender Schlußfolgerung: "Offensichtlich kommt es auf den stärker exponierten und rascher erwärmten Sommerhängen schon in verhältnismäßig jungen Beständen zu gewissen Spannungen zwischen Wasserversorgung und Wasserverbrauch. Auf den Winterhängen mit ihren großen Schneemengen und Wasserreserven treten solche Spannungen dagegen wohl erst in älteren Beständen mit größerem Kronenvolumen auf" (MITSCHERLICH 1957, S.180). Im Gegensatz zu WEIHE (1955) stellt MITSCHERLICH wie auch KOCH (1956) in Thüringen jedoch fest, daß "das Bonitätsniveau auf den Sonnenhängen mit der höheren Temperatur und der dementsprechend längeren Vegetationsdauer höher (ist) als auf den Winterhängen" (MITSCHERLICH 1957, S.180).

Der Vergleich des Wachstums von Fichten und Tannen auf einer mäßig frischen, einer wechselfeuchten und einer vernässenden Standortseinheit im Oberen Buntsandstein des Flächenschwarzwalds hat ergeben, daß sich die Untersuchungsbäume der verschiedenen Standorte in ihren Radialzuwachsreaktionen sehr ähnlich sind. Nur in wenigen Jahren sind gegenläufige Radialzuwachsreaktionen festzustellen. Möglicherweise besteht ein Zusammenhang zwischen dem Auftreten gegenläufiger Zuwachsreaktionen und extremen Witterungsverhältnissen. Die Hypothese, wonach bei den Fichten und Tannen des vernässenden Standorts wegen der flacheren Durchwurzelung und der eingeschränkten Wassernachlieferung aus dem Unterboden, in und nach Trockenjahren mit rascheren, stärkeren und nachhaltigeren Zuwachseinbrüchen zu rechnen ist, konnte anhand des hier untersuchten Materials nicht bestätigt werden.

Anhand des Vergleichs des Wachstums und der Wachstumsreaktionen von Fichten aus Hochlagen des Südschwarzwalds und aus dem kollinen Kaiserstuhlgebiet konnte gezeigt werden, daß hohe Verdunstungsanforderungen in den Monaten April bis Juni der Vorjahre zu einer signifikanten Hemmung des Radialzuwachses führen. Das Wärmeangebot während der laufenden Wachstumsperiode weist in den Hochlagen, allerdings nur in wenigen Jahren innerhalb des Untersuchungszeitraums, einen positiven Zusammenhang zu den Radialzuwachsen der Untersuchungsbäume auf. Die Fichten im Untersuchungsgebiet Kaiserstuhl zeigen sowohl gegenüber den Schwankungen der Wasserbilanz in den Monaten April bis August des laufenden Jahres, als auch gegenüber den Wasserbilanzschwankungen in den Monaten Juli bis Oktober der Vorjahre eine signifikante direkte Reaktion, bei seit Beginn des Jahrhunderts zunehmender Sensitivität. Auch in den Hochlagen sind die Radialzuwächse der untersuchten Fichten eng an die Wasserbilanzschwankungen in den Hochsommermonaten der Vorjahre gekoppelt.

Anhand der Zellstrukturanalyse konnten die langfristigen, im wesentlichen durch den Entwicklungszustand der Bäume bedingten Trendverläufe verschiedener Zellparameter herausgearbeitet werden. Die Fichten vom Hochlagenstandort Schluchsee weisen größere Zelldurchmesser, aber wesentlich

geringere Zellwanddicken der Spätholzzellen auf, als die Fichten aus dem Kaiserstuhlgebiet. Am Beispiel eines ausgewählten Jahres mit fröhsommerlicher Trockenheit konnten durch die Witterung verursachte Abweichungen von den mittleren Verläufen verschiedener Zellparameter nachgewiesen werden.

5. Zusammenfassung

Das Ziel des hier vorgestellten waldwachstumskundlichen Forschungsvorhabens besteht in der Untersuchung der Zusammenhänge zwischen der Variation von Klima und Witterung und den inter- und intraannuellen Zuwachsreaktionen von Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.), Tannen (*Abies alba* Mill.), Buchen (*Fagus sylvatica* L.) und Eichen (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. und *Quercus robur* L.) unter besonderer Berücksichtigung ausgewählter Standortfaktoren. Im Flächenschwarzwald wurden Fichten und Tannen entlang eines Gradienten zunehmender temporärer Vernässung auf einem mäßig frischen, einem wechselfeuchten und einem vernässenden Standort ausgewählt.

Im Gebiet des Südschwarzwalds und der Oberrheinischen Tiefebene wurden Untersuchungsbäume entlang von Talquerschnitten in den Höhenstufen kollin bis montan auf Sommer- und Winterhängen an Standorten ausgewählt werden, die sich im Hinblick auf das Wasserspeichervermögen und die Nährstoffausstattung des Bodensubstrats wenig unterscheiden.

Die für mitteleuropäische Verhältnisse extremen Unterschiede in den klimatischen Bedingungen zwischen den Hochlagen des Südschwarzwalds und den kollinen Lagen im Weinbauklima des Kaiserstuhls stellen eine kontrastreiche naturräumliche Kulisse dar, um das Wachstum und die Wachstumsreaktionen von Fichten, Tannen, Buchen und Eichen in einem einheitlichen regional-klimatischen Raum, aber unter, vom Niveau her, unterschiedlichsten klimatischen Bedingungen miteinander zu vergleichen. Im Zeitraum 1885 bis 1996 steht ein mittlerer jährlicher Wasserbilanzüberschuß von ca. 1200 mm in den Hochlagen einem solchen von 240 mm in der kollinen Höhenstufe im Kaiserstuhlgebiet gegenüber. In den Hochsommermonaten Juli bis August sind die relativen Unterschiede noch größer: Der mittlere Wasserbilanzüberschuß von knapp 100 mm in den Hochlagen des Südschwarzwalds ist rund 8 mal größer als jener in der kollinen Höhenstufe im Kaiserstuhlgebiet.

In allen hier dargestellten Gebieten und saisonalen Bezugsperioden ist ein tendenzieller Anstieg der mittleren Lufttemperaturen innerhalb des vergangenen über 100jährigen Zeitraums festzustellen. Der Anstieg der mittleren Lufttemperaturen ist in den Hochlagen des Südschwarzwalds weniger stark ausgeprägt als in den Vergleichsgebieten. Maximale Anstiegsraten sind in den Hochsommermonaten zu verzeichnen. Hier werden im Kaiserstuhlgebiet im jüngsten Jahrzehnt extrem hohe Werte erreicht.

Langfristige Trends sind bei den Niederschlagssummen weniger stark ausgeprägt als bei den Lufttemperaturen. Große Unterschiede zwischen den einzelnen Bezugszeiträumen sind seit Anfang der 70er Jahre in den dargestellten Gebieten des Südschwarzwalds, und etwa seit 1980 im Kaiserstuhlgebiet zu beobachten. Hier scheren die Kurven der mittleren Niederschlagssummen in einer während des über 100jährigen Zeitraums noch nie in dieser Art beobachteten Weise auseinander. Überdurchschnittlich hohen Jahresniederschlagssummen stehen weit unterdurchschnittliche Niederschlagssummen in der Vegetationsperiode, insbesondere aber in den Hochsommermonaten gegenüber. Diese Verhältnisse spiegeln sich auch in der klimatischen Wasserbilanz wider.

Oberhalb der submontanen Höhenstufe sind die mittleren Radialzuwächse der Fichten, Tannen und

Buchen von Standorten an Sommerhängen größer als die der Vergleichsbäume von Standorten an Winterhängen. In der kollinen Höhenstufe kehren sich die Verhältnisse um.

Bezüglich der mittleren Sensitivität sind bei den untersuchten Fichten keine klaren Zusammenhänge zur Höhenlage oder Exposition des Standorts zu erkennen. Während bei den untersuchten Tannen und Eichen die mittlere Sensitivität mit zunehmender Höhenlage abnimmt, nimmt sie bei den untersuchten Buchen von der submontanen zur hochmontanen Höhenstufe systematisch zu. Die stärkste Reaktion auf kurzfristig schwankende Umwelteinflüsse ist bei den Buchen festzustellen.

Mit der Hauptkomponentenanalyse der Radialzuwachschronologien der Fichten- und Buchenkollektive konnte gezeigt werden, daß der Standortfaktor Höhenlage einen stärker differenzierenden Einfluß auf die Radialzuwachsreaktionen ausübt als der Standortfaktor Exposition. Die gemeinsame multivariate Analyse der Radialzuwachschronologien von Fichten, Tannen und Buchen eines Winterhang- und eines Sommerhangstandorts ergab, daß die Chronologien durch einen gemeinsamen Einflußfaktor synchronisiert sind, demgegenüber art- und standortbezogene Muster in den Radialzuwachsreaktionen deutlich zurücktreten.

Der Vergleich des Wachstums von Fichten und Tannen auf einer mäßig frischen, einer wechselfeuchten und einer vernässenden Standortseinheit im Oberen Buntsandstein des Flächenschwarzwalds hat ergeben, daß sich die Untersuchungsbäume der verschiedenen Standorte in ihren Radialzuwachsreaktionen sehr ähnlich sind. Die Hypothese, wonach bei den Fichten und Tannen des vernässenden Standorts in und nach Trockenjahren mit rascheren, stärkeren und nachhaltigeren Zuwachseinbrüchen zu rechnen ist, konnte anhand des hier untersuchten Materials nicht bestätigt werden.

Anhand des Vergleichs des Wachstums und der Wachstumsreaktionen von Fichten aus Hochlagen des Südschwarzwalds und aus dem kollinen Kaiserstuhlgebiet konnte gezeigt werden, daß hohe Verdunstungsanforderungen in den Monaten April bis Juni der Vorjahre zu einer signifikanten Hemmung des Radialzuwachses führen. Das Wärmeangebot während der laufenden Wachstumsperiode weist in den Hochlagen, allerdings nur in wenigen Jahren innerhalb des Untersuchungszeitraums, einen positiven Zusammenhang zu den Radialzuwachsen der Untersuchungsbäume auf. Die Fichten im Untersuchungsgebiet Kaiserstuhl zeigen sowohl gegenüber den Schwankungen der Wasserbilanz in den Monaten April bis August des laufenden Jahres, als auch gegenüber den Wasserbilanzschwankungen in den Monaten Juli bis Oktober der Vorjahre eine signifikante direkte Reaktion, bei seit Beginn des Jahrhunderts zunehmender Sensitivität. Auch in den Hochlagen sind die Radialzuwächse der untersuchten Fichten eng an die Wasserbilanzschwankungen in den Hochsommermonaten der Vorjahre gekoppelt.

Anhand der Zellstrukturanalyse konnten die langfristigen, im wesentlichen durch den Entwicklungszustand der Bäume bedingten Trendverläufe verschiedener Zellparameter herausgearbeitet werden. Die Fichten vom Hochlagenstandort Schluchsee weisen größere Zelldurchmesser, aber wesentlich geringere Zellwanddicken der Spätholzzellen auf, als die Fichten aus dem Kaiserstuhlgebiet. Am Beispiel eines ausgewählten Jahres mit frühsommerlicher Trockenheit konnten durch die Witterung verursachte Abweichungen von den mittleren Verläufen verschiedener Zellparameter nachgewiesen werden.

6. Literaturverzeichnis

- Aptech Systems Inc. 1994. GAUSS-386™ System Version 3.1.5, for IBM PC-XT-AT-PS/2 & Compatibles. Maple Valley, WA.
- Barry, R.G. 1992. *Mountain Weather and Climate*. 2nd ed. London: Routledge. 402 S.
- Baumgartner, A. 1958. Nebel und Nebelniederschlag als Standortfaktoren am Großen Falkenstein. *Forstwissenschaftliches Zentralblatt* **77**: 257-272.
- _____. 1960: Gelände und Sonnenstrahlung als Standortfaktor am Gr. Falkenstein (Bayerischer Wald). *Forstwissenschaftliches Zentralblatt* **79**: 286-297.
- Biederbick, K.H. 1992. Die direkte Sonnenstrahlung als Standortfaktor. *Forstarchiv* **63**: 131-136.
- Cieslar, A. 1907. Einige Beziehungen zwischen Holzzuwachs und Witterung. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen* **33**: 289-311.
- Cochran, W.G. 1983. *Planning and Analysis of Observational Studies*. New York: John Wiley & Sons. 145 S.
- Cook, E.R. & Kairiukstis, L.A. (eds.) 1990. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 394 S.
- Cook, T.D. & Campbell, D.T. 1979. *Quasi-Experimentation: Design & Analysis Issues for Field Settings*. Chicago: Rand McNally College Publishing Company. 405 S.
- Fritts, H.C. 1976. *Tree Rings and Climate*. London: Academic Press. 567 S.
- Harvey, A.C. 1989. *Forecasting, Structural Time Series Models and the Kalman Filter*. Cambridge: Press Syndicate of the University of Cambridge. 554 p.
- Havlik, D. 1970. Inversionswetterlagen im südlichen Oberrheingebiet. *Meteorologische Rundschau* **23**: 129-134.
- International Tree-Ring Data Bank 1996. *International Tree-Ring Data Bank Program Library: Program COFECHA: dating and measurement quality control, Version 2.02* P. Tucson.
- Kahle, H.P. (ms.) 1994. Modellierung der Zusammenhänge zwischen der Variation von klimatischen Elementen des Wasserhaushalts und dem Radialzuwachs von Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.) aus Hochlagen des Südschwarzwalds - Eine standortbezogene dendroökologische Untersuchung unter besonderer Berücksichtigung von Trockenstreß. Dissertation Univ. Freiburg i. Br.: 194 S.
- Kahle, H.P. & Spiecker, H. 1995. Standortbezogene dendroökologische Untersuchungen entlang von Höhenprofilen im Schwarzwald - Arbeitshypothesen und Forschungskonzeption. *FZKA-PEF* **130**: 115-125.
- _____. 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). In: Dean, J.S., D.M. Meko & T.W. Swetnam (eds): *Tree Rings, Environment, and Humanity: Proceedings of the International Conference: Tucson, Arizona, 17-21 May 1994*. *Radiocarbon*: 785-801.
- Kern, K.G. & Moll, W. 1960. Der jahreszeitliche Ablauf des Dickenwachstums von Fichten verschiedener Standorte im Trockenjahr 1959. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* **131**: 97-116.
- Koch, H.G. 1956. Durchmesserzuwacherhebungen an Waldbäumen zum Nachweis von Geländeklimaeinflüssen. *Archiv für Forstwesen* **5**: 673-689.
- Larson, P.R. 1973 Wood formation and the concept of wood quality. *School of Forestry Bulletin* **74**: 54 p.

- Mäkinen, H. 1997. Wachstum von Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.) auf den ARINUS Flächen - Auswirkungen der Revitalisierungsdüngungen und witterungsbedingte Zuwachsvariation im Südschwarzwald. *FZKA-PEF* **156**: 130 S.
- Margl, H. 1971. Die direkte Sonnenstrahlung als standortsdifferenzierender Faktor im Bergland. *Allgemeine Forstzeitung Wien* **82**: 163-167.
- Merkel, H. 1984: Über den Witterungseinfluß auf die Jahrringstruktur der Gemeinen Kiefer (*Pinus silvestris* L.) - Ein Beitrag zur Dendrochronologie der Nadelhölzer. Dissertation Univ. Freiburg i. Br.: 135 S. + Anhang.
- Mitscherlich, G. 1957. Das Wachstum der Fichte in Baden. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* **128**: 171-184, 219-232 und 245-256.
- Mork, E. 1928 Die Qualität des Fichtenholzes unter besonderer Rücksichtnahme auf Schleif- und Papierholz. *Der Papier-Fabrikant* **48**: 741-747.
- Mueller-Dombois, D. & Ellenberg, H. 1974. *Aims and Methods of Vegetation Ecology*. New York: John Wiley & Sons. 547 S.
- Ott, E. 1978. Über die Abhängigkeit des Radialzuwachses und der Oberhöhen bei Fichte und Lärche von der Meereshöhe und Exposition im Lötschental. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* **129**: 169-193.
- Rasch, D.; Guiard, V. & Nürnberg, G. 1992. *Statistische Versuchsplanung*. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag. 386 S.
- Sachs, L. 1988. *Statistische Methoden: Planung und Auswertung*. 6. neub. und erw. Aufl. Berlin: Springer-Verlag. 298 S.
- _____ 1992 *Angewandte Statistik*, 7. neubearb. Aufl., Berlin: Springer-Verlag. 846 S.
- SAS Institute Inc. 1991 SAS™ Version 6.08. Cary, NC.
- Schönwiese, C.D. & Rapp, J. 1997. *Climate Trend Atlas of Europe Based on Observations 1891-1990*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 228 S.
- Schweingruber, F.H. 1983. *Der Jahrring: Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie*. Bern: Haupt. 234 S.
- _____ 1993. *Jahrringe und Umwelt - Dendroökologie*. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. 474 S.
- Spiecker H.; Mielikäinen, K.; Köhl, M. & Skovsgaard J.P. (eds.) 1996. Growth Trends in European Forests - Studies From 12 Countries. *European Forest Institute Research Report* **5**: 372 S. Berlin: Springer-Verlag.
- Thorntwaite, C.W. & Mather J.R. 1955. The water balance. *Publ. in Climatology - Drexel Inst. of Tech., Lab. of Clim.* **8/1**: 104 S.
- Tilman, D. 1988. Ecological experimentation: strengths and conceptual problems. In: Likens, G.E. (ed.). *Long-Term Studies in Ecology - Approaches and Alternatives*. New York: Springer-Verlag. S. 136-157.
- Turner, H. 1961. Jahresgang und biologische Wirkungen der Sonnen- und Himmelstrahlung an der Waldgrenze der Ötztaler Alpen. *Wetter und Leben* **13**: 93-113.
- Van Deusen, P.C. 1989. A model-based approach to tree ring analysis. *Biometrics* **45**: 763-779.
- _____ 1990. Evaluating time-dependent tree ring and climate relationships. *Journal of Environmental Quality* **19**: 481-488.
- _____ 1992 DYNACLIM Version 3.2. New Orleans.
- Weihe, J. 1955. Das Wachstum der Fichte nach den badischen Versuchsflächen. *Schriftenreihe der Badischen Forstlichen Versuchsanstalt* **11**: 85 S.
- _____ 1958. Die Schwankungen des Durchmesserzuwachses in badischen Fichtenbeständen in der Zeit von 1945 bis 1954. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* **129**: 233-241.

Whittaker, R.H. 1967. Gradient analysis of vegetation. *Biological Reviews* **42**: 207-264.

Wilpert, K. von 1990. Die Jahrringstruktur von Fichten in Abhängigkeit vom Bodenwasserhaushalt auf Pseudogley und Parabraunerde: Ein Methodenkonzept zur Erfassung standortspezifischer Wasserstreßdisposition. *Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen* **24**: 184 S.

7. Anhang

Anhang 1: Beschreibung der untersuchten Standorteinheiten.

Beschreibung der Ökoserie	Beschreibung der Standorteinheit	Ökologische Artengruppen	Humsform, Bodentyp
HS1: Ökoserie der lehmigen Hochlagenhänge, Lehmiger Hochlagen-Sommerhang			
Mittel- bis tiefgründiger, steinig-grusiger, ± sandiger Lehm an Hängen; Bohrtiefe i.d.R. über 60 cm.	Meist mäßig frische, örtlich frische Hanglagen	Ajuga reptans-, Deschampsia flexuosa-, Vaccinium myrtillus-, Adenostyles alliariae-, Millium effusum-, Luzula albida-, (Blechnum spicant-, Juncus-) Gruppe	Mull bis Mullmoder; humose Braunerde
HW1: Ökoserie der lehmigen Hochlagenhänge, Lehmiger Hochlagen-Winterhang			
Mittel- bis tiefgründiger, steinig-grusiger, ± sandiger Lehm an Hängen; Bohrtiefe i.d.R. über 60 cm.	Mäßig frische bis frische Hanglagen	Ajuga reptans-, Millium effusum-, Vaccinium myrtillus-, Deschampsia flexuosa-, Adenostyles alliariae-, Luzula albida-, Blechnum spicant-, (Lamium galeobdolon-, Aruncus dioicus-, Urtica dioica-) Gruppe	Mull bis Mullmoder; humose Braunerde
MS1: Ökoserie der lehmigen Grushänge, Sommerhänge, Mäßig frischer lehmig-grusiger Sommerhang			
Mittel- bis tiefgründige, mindestens bis 40 cm Tiefe steinarmlige, lehmig-grusige Böden; Lehmgehalt ± gering, nach unten meist zunehmend.	Mäßig frische, Hanglagen	Milium effusum-, Ajuga reptans-, Deschampsia flexuosa-, Aruncus dioicus-, Luzula sylvatica-, (Asarum europaeum-, Stachys sylvatica-, Vaccinium myrtillus-) Gruppe	2Mull bis Mullmoder, örtlich Moder; Braunerde
MW1: Ökoserie der Lehmhänge, Winterhänge, Mäßig frischer lehmiger Winterhang			
Mittel- bis tiefgründige, meist steinarmlige, lehmige Böden mit wechselndem Grus- und Sandanteil.	Mäßig frische, selten bis mäßig trockene Hanglagen	Ajuga reptans-, Deschampsia flexuosa-, Aruncus dioicus-, Carex brizoides-, (Milium effusum-, Asarum europaeum-, Stachys sylvatica-, Impatiens noli tangere-, Vaccinium myrtillus-) Gruppe	Mullmoder bis Moder, selten Mull; Braunerde, selten Parabraunerde
SS1: Ökoserie der lehmigen Grushänge, Sommerhänge, Mäßig frischer lehmig-grusiger Sommerhang			
Mittel- bis tiefgründige, mindestens bis 40 cm tiefe, ± steinarmlige, sandig-lehmig-grusige Böden mit wechselnden Korngrößen und unterschiedlichem Lehmgehalt.	Mäßig frische Hanglagen	Milium effusum-, Ajuga reptans-, Luzula sylvatica-, Luzula albida-, Lamium galeobdolon-, Deschampsia flexuosa-, (Vaccinium myrtillus-) Gruppe	Mull bis Mullmoder; Braunerde
SS2: Ökoserie der lehmigen Steinschutthänge, Sommerhänge, Mäßig frischer lehmiger Steinschutt-Sommerhang			
Stark steinige, flach- bis mittelgründige, lehmig-sandig-grusige Böden (Bohrtiefe meist weniger als 40 cm), Steinschutt meist schon im Oberboden, Wurzelraum teilweise eingeengt.	Mäßig frische Hanglagen	Milium effusum-, Ajuga reptans-, Luzula albida-, Luzula sylvatica-, Deschampsia flexuosa-, (Vaccinium myrtillus- Mercurialis perennis-) Gruppe	Mull bis Mullmoder; Braunerde, örtlich Ranker-Braunerde
SS3: Ökoserie der lehmigen Steinschutthänge, Sommerhänge, Mäßig trockener Steinschutt-Sommerhang			
Stark steinige, flach- bis mittelgründige, lehmig-sandig-grusige Böden (Bohrtiefe meist weniger als 40 cm), Steinschutt meist schon im	Mäßig trockene Oberhänge und breite Hanglagen	Deschampsia flexuosa-, Luzula albida-, Milium effusum- Luzula sylvatica-, (Silene nutans-, Vacci-	Mull bis Mullmoder; Braunerde, örtlich

Beschreibung der Ökoserie	Beschreibung der Standorteinheit	Ökologische Artengruppen	Humsform, Bodentyp
Oberboden, Wurzelraum teilweise eingeengt.	grücken	nium myrtillus-) Gruppe	Ranker-Braunerde
SW1: Ökoserie der Lehmhänge, Winterhänge, Mäßig frischer lehmiger Winterhang			
Mittel- bis tiefgründige, meist steinarne, lehmige Böden mit wechselndem Grus- und Sandanteil.	Mäßig frische Hanglagen	Milium effusum-, Ajuga reptans-, Luzula albida-, Luzula sylvatica- (Mercurialis perennis-) Gruppe	Mull bis Mullmoder; Braunerde
KS1: Ökoserie der lehmigen Grushänge, Sommerhänge, Mäßig trockener lehmig-grusiger Sommerhang			
Mittel- bis tiefgründige, mindestens bis 40 cm tiefe, ± steinarne, sandig-lehmig-grusige Böden mit wechselnden Korngrößen und unterschiedlichem Lehmgehalt.	Mäßig trockene Oberhänge und breite Hanggrücken	Deschampsia flexuosa-, Luzula albida-, Milium effusum- Luzula sylvatica-, (Silene nutans-, Vaccinium myrtillus-) Gruppe	Mullmoder bis Moder, örtlich Hagerhumus; ± podsolige Braunerde
KS2: Ökoserie der lehmigen Grushänge, Buchenwald auf mäßig frischem lehmigen Grushang			
Mittel- bis tiefgründige, mindestens aber 40 cm tiefe, steinarne, sandig-lehmig-grusige Böden mit wechselndem Lehmgehalt, der nach unten oft zunimmt; stellenweise Feinlehmvergütung.	Mäßig frische, sonn- und schattseitige Hanglagen	Milium effusum-, Luzula sylvatica-, Luzula albida-, Ajuga reptans-, Lamium galeobdolon-, Deschampsia flexuosa Gruppe	Mull bis Mullmoder; Braunerde
KW1: Ökoserie der lehmigen Grushänge, Buchenwald auf mäßig frischem lehmigen Grushang			
Mittel- bis tiefgründige, mindestens aber 40 cm tiefe, steinarne, sandig-lehmig-grusige Böden mit wechselndem Lehmgehalt, der nach unten oft zunimmt; stellenweise Feinlehmvergütung.	Mäßig frische, sonn- und schattseitige Hanglagen	Milium effusum-, Luzula sylvatica-, Luzula albida-, Ajuga reptans-, Lamium galeobdolon-, Deschampsia flexuosa-Gruppe	Mull bis Mullmoder; Braunerde
KW2: Ökoserie der lehmigen Grushänge, Standorte im Grundgebirge (Paragneise, kulmische Konglomerate, Klemmbachgranit, Schuttbildungen), Buchenwald auf mäßig frischem lehmig-grusigen Hang			
Mittel- bis tiefgründige, mindestens bis 40 cm Tiefe steinarne, lehmig-grusige Böden; erhöhter Lehmanteil, meist im Oberboden.	Mäßig frische, sonn- und schattseitige Hanglagen	Milium effusum-, Ajuga reptans-, Asarum europaeum-, Luzula sylvatica-, (Aruncus dioicus-, Deschampsia flexuosa-, Mercurialis perennis-, Stachys sylvatica-) Gruppe	Mull bis Mullmoder; Braunerde
KK1: Ökoserie der Vulkanitlehmhänge, Buchen-Eichen-Wald auf mäßig frischem Vulkanitlemhang			
± tonige und skelettreiche, <u>kalkfreie</u> Vulkanit-Verwitterungslehme.	Mäßig frischer bis frischer, mittelgründiger, z.T. skelettreicher, schwach saurer Vulkanitlehm	Deschampsia flexuosa-, Silene nutans-, Millium effusum-, (Vaccinium myrtillus-) Gruppe	Mullmoder bis Moder; Braunerden bis podsolige Braunerden, seltener Mullranker
KK2: Ökoserie der Vulkanitlehmhänge, Buchen-Eichen-Wald auf mäßig trockenem Vulkanitlemhang			
± tonige und skelettreiche, <u>kalkfreie</u> Vulkanit-Verwitterungslehme.	Mäßig trockener bis trockener, örtlich mäßig frischer, flach- bis mittelgründiger, skelettreicher, schwach saurer Vulkanitlehm	Deschampsia flexuosa-, Silene nutans-, Millium effusum-, (Vaccinium myrtillus-) Gruppe	Mullmoder bis Moder; Braunerden bis podsolige Braunerden, seltener Mullranker
KK3: Ökoserie der Löbhänge, Buchenwald auf mäßig frischem Löbhang			

Beschreibung der Ökoserie	Beschreibung der Standorteinheit	Ökologische Artengruppen	Humsform, Bodentyp
Pararendzinen aus Löß mit Rohlöß im Untergrund, selten auch über Vulkaniten. Meist freier Kalk bis zur Oberfläche. Entkalkung bis zu 30 cm ist möglich.	Mäßig frischer bis frischer, selten kleinflächig auch mäßig trockener, mittel- bis tiefgründiger humoser Lößboden	Ajuga reptans-, Lamium galeobdolon-, Asperula odorata-, Millium effusum-, Mercurialis perennis-, (Stachys silvatica-, Urtica dioica-, Silene nutans-) Gruppe	Mull; Pararendzinen
MF: Ökoserie der nicht vernässenden lehmigen Sande, Stark saurer mäßig frischer lehmiger Sand			
Mindestens 60 cm bohrbarer, wechselnd steiniger, schwach lehmiger Sand bis sandiger Lehm, i.d.R. lehmiger Sand, z.T. mit schwacher Schlufflehmbeimengung über meist durchlässigem tonigen Sand bis sandigen Ton aus Verwitterung des Oberen, seltener des Mittleren Buntsandsteins; i.d.R. Fließerdebildungen.	Mäßig frische, teilweise grundfrische Flachlagen	Vaccinium myrtillus-, Deschampsia flexuosa-, Blechnum spicant-, Ajuga reptans-, Sphagnum-, Molinia-Gruppe	Moder bis Rohhumus; podsolierte bis podsolierte Braunerde
WF: Ökoserie der mehr oder weniger vernässenden lehmig-sandigen Böden, Stark saurer wechselfeuchter lehmig-sandiger Boden			
30 bis 60 cm steinig-lehmiger Sand bis sandiger Lehm, z.T. mit schwacher Schlufflehmbeimengung und unterschiedlich starken Staunäsemerkmalen über schwer durchlässiger, toniger Verwitterung des Oberen, seltener des Mittleren Buntsandsteins in wechselnder Tiefe.	Wechselfeuchte Flachlagen, z.T. stauender Ton in 30 bis 60 cm Tiefe	Vaccinium myrtillus-, Deschampsia flexuosa-, Sphagnum-, Blechnum spicant-, Molinia-, Calluna vulgaris Gruppe	Moder bis Rohhumus; podsolierte bis podsolierte Braunerde-Pseudogley bis Pseudogley
VN: Gruppe der Missen, vermoorten Lagen und Moorstandorte, Nasse bzw. wasserzügige Misse			
Mindestens 10/15 cm mächtige organische Auflage über deutlich naßgebleichtem Sand oder sandigem Lehm; im Unterboden meist stauender Ton, Mäßig frischer lehmiger Winterhang.	Nasse, abzugsträge bis abzugslose flache Mulden auf der Hochfläche im Oberen Buntsandstein	Vaccinium myrtillus-, Sphagnum-, Deschampsia flexuosa- Molinia-, Blechnum spicant-, Calluna vulgaris-, Oxycoccus palustris-Gruppe	Rohhumus bis Feucht-Rohhumus; Stagnogley bis Moor-Stagnogley

Standortkarten: Fbz. Breisach, OT 110 (1979), Fbz. Müllheim, S 132 + 134 (1977), Fbz. Staufen, S 293 + 298 (1988), Fbz. Todtnau, S 268 (1986).