

**BONNER GEOGRAPHISCHE ABHANDLUNGEN**

Heft 103

ISSN 0373-0468

**Jan ESPER**

**Paläoklimatische Untersuchungen  
an Jahrringen Im Karakorum und  
Thien Shan Gebirge (Zentralasien)**

Herausgeber:

K.A. Boesler - R. Dikau - E. Ehlers - R. Grotz - P. Höllermann - M. Winiger

Schriftleitung: H.-J. Ruckert



ASGARD-VERLAG SANKT AUGUSTIN 2000

**Paläoklimatische Untersuchungen  
an Jahrringen im Karakorum und  
Thien Shan Gebirge (Zentralasien)**

Jan ESPER

**Paläoklimatische Untersuchungen  
an Jahrringen im Karakorum und  
Thien Shan Gebirge (Zentralasien)**

Herausgeber:

K.A. Boesler · R. Dikau · E. Ehlers · R. Grotz · P. Höllermann · M. Winiger

Schriftleitung: H.-J. Ruckert



# **Paläoklimatische Untersuchungen an Jahrringen im Karakorum und Thien Shan Gebirge (Zentralasien)**

von

**Jan ESPER**

mit 33 Figuren und 10 Tabellen

In Kommission bei

**Asgard-Verlag · Sankt Augustin**

**alle Rechte vorbehalten**

**ISBN 3 - 537 - 87653 - X**

**© 2000 Asgard-Verlag Dr. Werner Hippe GmbH, 53757 Sankt Augustin**

**Herstellung: Druckerei Martin Roesberg, 53347 Witterschlick**

**Umschlaggestaltung: G. Storbeck**

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand auf Anregung von Prof. Dr. M. Winiger (Universität Bonn) im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Kulturraum Karakorum“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG). Ihm gilt mein aufrichtiger Dank für die stets engagierte wissenschaftliche Betreuung. Die spezifisch dendroklimatologischen Konzeptionen, die Art, an das Material heranzugehen und es zu analysieren, sind eng mit dem Namen Prof. Dr. F.H. Schweingruber (WSL, Birmensdorf/CH) verbunden. Für seine intensive Betreuung, insbesondere für die Ideen und Sichtweisen, die er in die Arbeit eingebracht hat, bin ich ihm sehr verbunden.

Den Mitgliedern der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. M. Winiger am Institut und denen des Schwerpunktprogramms Karakorum möchte ich für die Diskussionsbereitschaft und Kooperation bei der Lösung diverser kleinerer Probleme danken. Besonders erwähnt sei die Koordination des Programms unter Leitung von Prof. Dr. I. Stellrecht (Universität Tübingen), die mir den Zugang zur Projektinfrastruktur in Pakistan gewährte, und Dr. U. Müller (Intercooperation, Bern/CH), der uns herzlich in Kirgistan aufnahm und gemeinsam mit Dr. B.I. Vienglovsky (Forstinstitut, Bishkek/KIR) vor Ort betreute.

Dr. O.U. Bräker (WSL, Birmensdorf/CH) danke ich ganz herzlich für die Geduld, die er mir auf seine äußerst fachkundige und intensive Art bei der Lösung dendrochronologisch-statistischer Fragestellungen entgegen brachte. Ebenso möchte ich A. Bräuning (Universität Stuttgart), P. Krusic (Lamont-Doherty Geological Observatorium, Columbia University, New York/U.S.A.) und Dr. B. Schmidt (Universität Köln) danken, die, an dendroklimatischen Fragestellungen in Zentralasien (Tibet bzw. Nepal) arbeitend, immer zu einem intensiven fachlichen Austausch bereit waren. Mit Prof. Dr. J. Bendix hatte ich das Glück, einen kompetenten Ansprechpartner zu den verschiedensten Fragen der Zeitreihenanalyse kennen zu lernen. Besonders erwähnen möchte ich die Hilfsbereitschaft von Dr. J. Böhner (Universität Göttingen), der mir meteorologische Meßreihen aus Zentralasien zur Verfügung gestellt hat. Jederzeit fruchtbar war auch die Diskussion mit den „Isotopen-Experten“ des Forschungszentrums Jülich, Dr. G.H. Schleser und Dr. B. Zimmermann. B. Feiertag, T. Forster und P. Nogler von der Eidg. Forschungsanstalt WSL (Birmensdorf/CH) präparierten die Dichtechronologien und unterstützten mich fachkundig bei der Auswertung dieses Jahrringmerkmals. Herzlich danken möchte ich auch Frank Rinn (Heidelberg), dessen außergewöhnlicher Support weit über spezielle Fragen zum Dendro-Programm TSAP hinaus ging.

Sehr herzlich verbunden bin ich B. Neuwirth und K. Treydte. Die Zusammenarbeit mit den beiden war immer, auch in den heißen Phasen ihrer Diplomarbeiten, spannend und sehr lehrreich für mich. Von den Mitgliedern der Dendro-Gruppe in Bonn möchte ich stellvertretend H. Gärtner erwähnen. Den Austausch und die vielfältigen Fragestellungen, die wir diskutiert haben, empfand ich immer als sehr anregend.

Zu besonderem Dank bin ich den Herren T. Heidemann, T. Reineke und F. Wieneke verpflichtet, die mich uneigennützig bei den Feldaufenthalten in Pakistan und Kirgistan unterstützten. A. Burchardi-Theiss, D. Felbick, M. Gref, T. Heidemann, B. Neuwirth, T. Reineke und K. Treydte gilt auch mein Dank für die Durchsicht des Manuskripts oder Teilen davon und verschiedener Figuren. Schließlich möchte ich meine Eltern erwähnen, auf die ich mich in all den Studienjahren immer verlassen konnte.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft bin ich für die gewährte Förderung (DFG No. Wi-937/1-7) zu Dank verpflichtet.

## Inhalt

Vorwort	V
Verzeichnis der Figuren	VIII
Verzeichnis der Tabellen	X
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.2 Problemstellung und Konzeption	2
1.3 Untersuchungsräume und Standorte	6
<b>2 Methoden</b>	<b>14</b>
2.1 Indexierungen	14
2.2 Homogenität oder Streuung?	18
2.3 Weiserwerte	20
2.4 Kalibration und Rekonstruktion	21
<b>3 Daten</b>	<b>23</b>
3.1 Dendrochronologische Daten	23
3.1.1 Wachstumsstrategien und phänologische Merkmale	25
3.1.2 Typisierung des Wachstums	26
3.2 Meteorologische Daten	33
<b>4 Mittel- und langfristige Wachstumsvariationen</b>	<b>39</b>
4.1 Standortinterne Homogenität	39
4.2 Standortvergleiche	47
4.3 Regionale und überregionale Vergleiche	55
4.4 Säkulare Trends	61
<b>5 Extremjahanalyse</b>	<b>68</b>
5.1 Regionale Weiserjahre in Pakistan und Kirgistan	70
5.2 Klimatische Erklärung von Extremjahren in Pakistan	75
<b>6 Klima/Wachstums-Beziehungen</b>	<b>82</b>
6.1 Klimatische Steuerung interannueller Wachstumsvariationen in Pakistan	83
6.2 Klimatische Steuerung niederfrequenter Signale in Pakistan	90
6.3 Methodenverbund aus Jahringbreite und -dichte in Kirgistan	93
6.4 Temperaturrekonstruktion seit AD 790 in Pakistan	99
<b>7 Diskussion</b>	<b>105</b>
<b>8 Zusammenfassung</b>	<b>112</b>
<b>9 Literatur</b>	<b>118</b>
<b>Anhang</b>	

## Figuren

Fig. 1	Untersuchungsregionen in Zentralasien	7
Fig. 2	Beprobungsstrategie im NW-Karakorum	10
Fig. 3	Ökogramme im NW-Karakorum und Tien Shan	13
Fig. 4	<i>Juniperus semiglobosa</i> und <i>Juniperus seravchanica</i> im Vergleich	25
Fig. 5	Idealisierte Stammscheibe eines Wacholders	27
Fig. 6	Altersverteilung der Bäume in Kirgistan und Pakistan	31
Fig. 7	Wachstumsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Alter	32
Fig. 8	Länge der meteorologischen Meßreihen	34
Fig. 9	Mean6 – Regionale Temperatur- und Niederschlagreihe	37
Fig. 10	Zuwachskurven an den Standorten Chap2, Mor3 und Sat2	40
Fig. 11	$\delta d$ -indexierte Chronologien von 5 kirgisischen und 16 pakistanischen Standorten	42
Fig. 12	$\delta d$ -indexierte Zuwachskurven an Standort Sat2 und jährliche Variationskoeffizienten	46
Fig. 13	$\delta d$ -Standortchronologien am Transekt des Chaprot Tals	48
Fig. 14	$\delta d$ -Standortchronologien im Karagui Tal (Kirgistan)	51
Fig. 15	Ausgewählte $\delta d$ -Standortchronologien im Vergleich	52
Fig. 16	$\delta d$ -Chronologien der Hochlagenstandorte im Morkhun und Satpara Tal	53
Fig. 17	$\delta d$ -Chronologien der Täler im Vergleich	56
Fig. 18	Ländervergleich Kirgistan zu Pakistan (Hochlagenchronologien)	59
Fig. 19	$\delta d$ -Anpassungen für die Indexierung in Standort BON (Kirgistan)	62
Fig. 20	$\delta d$ -Anpassungen von 97 Bäumen (>500 Jahre) aus Pakistan und Kirgistan	64
Fig. 21	17 „tausendjährige“ Wacholder aus Pakistan und Streuung	66
Fig. 22	Very Low Frequency Signal von 17 „tausendjährigen“ Wachholdern seit AD 618	67
Fig. 23	Temperatur- und Niederschlagjahresgang in ausgewählten Weiserjahren und Standortreaktionen (Pakistan)	77
Fig. 24	Korrelationskoeffizienten zwischen der regionalen Klimareihe (Mean6) und $\delta d$ -Standortchronologien (AD 1900-75)	84
Fig. 25	Korrelationskoeffizienten zwischen Mean6 und ausgewählten Standortchronologien	88
Fig. 26	Gleitkorrelation in einem 15-jährigen Zeitfenster zwischen Mean6 und der $\delta d$ -Hochlagenchronologie PakHoch in Pakistan (AD 1883-1983)	89
Fig. 27	Jahrestemperaturen und Jahresniederschläge im Vergleich zu PakHoch und Korrelationskoeffizienten	91

Fig. 28	<i>Picea tienschanica</i> , maximale Dichte-Chronologie und Belegungsdichte	94
Fig. 29	Korrelationskoeffizienten zwischen Klima-, Dichte- und Jahrringreihen AD 1886-1970	95
Fig. 30	Korrelationskoeffizienten zwischen Jahrringbreitenchronologien von <i>Picea tienschanica</i> bzw. <i>Juniperus spec.</i> zu Naryn (Klimastation) AD 1886-1970	97
Fig. 31	Lineare Regressionen der Jahrringbreite von PakHoch zu $T_{(a)}$ von Mean6	100
Fig. 32	Temperaturrekonstruktion seit AD 790, Hochlagen Pakistan	102
Fig. 33	„Klimaevents“ im westlichen Zentralasien seit AD 618	103

## Tabellen

Tab. 1	Standorte im Tien Shan (Kir) und NW-Karakorum (Pak)	9
Tab. 2	Probenzahl, Alter, Wachstum und Streuung an den Standorten	29
Tab. 3	Korrelationskoeffizienten zwischen Temperaturreihen	36
Tab. 4	Statistische Kennziffern der Rohwerte und $\delta d$ -Indizes	44
Tab. 5	Korrelationsmatrix – Vergleich der Standorte (AD 1796-1990)	49
Tab. 6	Korrelationskoeffizienten der Talchronologien (AD 1283-1990)	57
Tab. 7	1000-jährige Wacholder in Pakistan	65
Tab. 8	Regionale Weiserjahre in Pakistan seit AD 932 und Kirgistan seit AD 1427	71
Tab. 9	Zusammensetzung von 12 positiven & negativen Weiserjahren in Pakistan seit AD 1876	74
Tab.10	Intensivste Weiserjahre pakistanischer Standorte, die nicht zu regionalen WJ gehören, und klimatische Erklärung	80



## 1 EINFÜHRUNG

Heute ist die Jahrringforschung als Disziplin anerkannt, mit deren Hilfe vergangene Umweltzustände rekonstruiert werden können (SCHWEINGRUBER 1996), sei es die Klimageschichte (BRIFFA et al. 1998b), die Frequenz und Amplitude geomorphologischer Prozesse (SHRODER 1980) oder die von Waldbränden (SWETNAM 1993). Ausgehend von der Beobachtung einer sich zunehmend wandelnden Umwelt, werden insbesondere mit der drohenden globalen Temperaturerhöhung verschiedene gesellschaftspolitische Herausforderungen an die Zukunft gestellt (IPCC 1990, 1996). Um das klimatisch Gewesene, die natürlichen Amplituden und Frequenzen sowie die „Forcing Factors“ (JONES et al. 1996:501-81) zu rekonstruieren und zu verstehen, werden zahlreiche Proxidaten unterschiedlicher Auflösung analysiert (GASSE et al. 1991, MANN et al. 1998). Die Dendroklimatologie beteiligt sich an dieser Diskussion, indem sie Jahrringmerkmale mit gemessenen Klimaelementen korreliert. Schrittweise multiple Regressionsverfahren und zahlreiche weitere statistische Methoden werden herangezogen, um mit Hilfe von Transfermodellen den sogenannten „Climate Impact“ aus dem Jahrring zu extrahieren (COOK et al. 1992c, FRITTS 1976). Neben der seit jeher berücksichtigten Jahrringbreite gewinnen zunehmend die Jahrringdichte (ESCHBACH et al. 1995, SCHWEINGRUBER et al. 1978) und neuerdings auch Isotopenanalysen, wie  $\delta^{13}\text{C}$  oder  $\delta^{18}\text{O}$  (CRAIG 1954, FARQUHAR et al. 1982, LEAVITT et al. 1995, SCHLESER 1995) an Bedeutung.

Im globalen Maßstab sind dendroklimatologische Arbeiten ungleich verteilt. Gegenüber der südlichen (COOK et al. 1991) ist die Nordhemisphäre (BRIFFA et al. 1990, 1995) intensiver erforscht. Die besten Klimarekonstruktionen hoher räumlicher Dichte stammen aus den Gebirgen Nordamerikas (LA MARCHE 1974) und Europas (HÜSKEN 1994). Hier entstanden auch die dendroklimatologischen Netzwerke, mit deren Hilfe die Verteilung von Klimaelementen im fast kontinentalen Maßstab rekonstruiert werden kann (BRIFFA et al. 1988, 1992b, SCHWEINGRUBER et al. 1991a). In jüngster Zeit ist die gesamte nordische Waldgrenze zirkumpolar dokumentiert worden (BRIFFA et al. 1998a, 1998b, SCHWEINGRUBER et al. 1996). Bemerkenswert ist, daß die meisten lokalen und regionalen Chronologien einen Bereich von 300 bis 500 Jahren und nur selten mehr als 1000 Jahre erfassen (HUGHES et al. 1996, SCHWEINGRUBER 1996). Mit der Bristlecone Pine (*Pinus longaeva* D.K. Bailey) wachsen die ältesten Bäume im SW der U.S.A., in den White Mountains (FERUGSON 1968). Die längste Reihe jedoch, die bis dato erstellt werden konnte, ist die nahezu 12.000 Jahre umfassende Süddeutsche Eichenchronologie (BECKER 1993).

## 1.1 Problemstellung und Konzeption

Vor diesem Hintergrund erscheint Zentralasien (zur Abgrenzung vgl. STADELBAUER 1997) fast wie ein weißer Fleck auf der Karte dendroklimatologischer Arbeiten (HUGHES et al. 1982, SCHWEINGRUBER 1996). Aus dem Karakorumgebirge sind nur wenige Studien bekannt. Es existieren keine mehrhundertjährigen Reihen ausreichender Belegungsdichte (= Anzahl der Einzelbäume, die zu einer Chronologie beitragen), die Rückschlüsse auf vergangene Klimate zulassen (AHMED 1989, AHMED et al. 1991, BILHAM et al. 1983, ESPER et al. 1995). Ähnlich ist die Situation in den Hochgebirgen Kirgistans, wo jedoch die Untersuchungen an Wacholdern von GRAYBILL et al. (1992) einen ersten Eindruck vom Potential dendroklimatologischer Rekonstruktionen zeigen. Eine *Juniperus*-Chronologie in 3450m NN aus dem Tien Shan (AD 876) ist die bisher längste Reihe aus dem westlichen Zentralasien.<sup>1</sup> Intensivere Untersuchungen sind vom monsunal beeinflussten Nordindien bekannt (BHATTACHARYA et al. 1988, HUGHES 1992, PANT et al. 1990, YADAV et al. 1992, 1997). Hier konnte ein „Western Himalaya Tree-Ring Network“ aus verschiedenen Baumarten zwischen 1600m und 3400m NN installiert werden. PANT et al. (1990) kalibrieren Jahrringsignale an meteorologischen Reihen, finden in den letzten 250 Jahren jedoch keine Low-Frequency<sup>2</sup> Variationen, die beispielsweise mit der Kleinen Eiszeit parallelisierbar wären. HUGHES (1992) rekonstruiert aus Dichteserien von *Abies pindrow* Frühjahrs- und Sommertemperaturen seit AD 1690. Ebenfalls an Bäumen aus der Kashmir-Region belegen RAMESH et al. (1985) in einem methodischen Aufsatz die klimatische Sensitivität verschiedener stabiler Isotope.

Aus den weiter entfernt liegenden Räumen Zentralasiens (FENG et al. 1993, XIANGDING et al. 1995, XINGCHENG et al. 1997) sind die Arbeiten

---

<sup>1</sup> Mit dem Tod von Donald Graybill sind die Studien jäh unterbrochen worden. Gary Funkhouser vom Tree Ring Lab in Tucson verwaltet den wissenschaftlichen Nachlaß Graybills und prüft zur Zeit das Potential für Temperaturrekonstruktionen an den kirgisischen Standorten.

<sup>2</sup> Als „Low-Frequency“ werden niederfrequente Variationen oberhalb von mindestens 10 Jahren bezeichnet. Demgegenüber fallen die interannuellen Variationen unter den Begriff „High-Frequency“. „Very-Low-Frequency“ sind säkulare Schwankungen. In der deutschsprachigen dendrochronologischen Literatur haben sich keine Synonyme etabliert, weshalb hier der internationale Standard verwendet wird. Dendrochronologische Fachbegriffe, soweit sie nicht im Text beschrieben sind oder unklar bleiben, können gegebenenfalls im „Multilingual Glossary of Dendrochronology“ (KAENNEL et al. 1995) nachgeschlagen werden. KAENNEL et al. (1995) normieren die Fachnomenklatur in sieben Sprachen, von der „Belegungsdichte“ bis zum „Weiserjahr“.

von BRÄUNING (1994a, 1994b) und BRÄUNING et al. (1996) in Osttibet relevant. Neben zahlreichen anderen Chronologien ragt eine mehr als 1000jährige *Juniperus*-Reihe heraus, von der auch  $\delta^{13}\text{C}$ -Variationen mit einer 5-jährigen Auflösung bestimmt wurden (ZIMMERMANN et al. 1997). Von einem Waldgrenzstandort in der westlichen zentralen Mongolei (Tarvagatay Mountains) stammt eine temperatursensitive *Pinus sibirica*-Chronologie, die eine Erwärmung seit AD 1550 dokumentiert (JACOBY et al. 1996). Demnach sind die Temperaturen in der zweiten Hälfte des 20. Jh.s höher als in allen Perioden der letzten 450 Jahre.

Auf der anderen Seite werden von internationalen Vereinigungen wie dem IGBP (The International Geosphere-Biosphere Programme) zunehmend hochauflösende Rekonstruktionen gefordert (EDDY 1992, HUGHES 1996). PAGES (1994) ermuntert die Dendrochronologie, sich verstärkt an Paläoklimaprogrammen entlang festgelegter interkontinentaler Transekte zu beteiligen. Zentralasien ist in der PAGES-Strategie essentieller Bestandteil des sogenannten „Austral-Asian Transect“ (Pole-Equator-Pole, PEP II), in dessen Achse die Bedeutung der Region um das Hochland von Tibet als „Dritter Pol“ betont wird (PAGES 1995). Vom PANASH-Projekt (Paleoclimates of the Northern and Southern Hemispheres) werden für die Zeitscheibe von 2000 Jahren u.a. folgende Fragestellungen als relevant eingestuft (PAGES 1995:5):

- i) Wie ungewöhnlich ist das 20. Jh. im Vergleich zu den letzten 2000 Jahren?
- ii) War die „Kleine Eiszeit“ synchron und von vergleichbarer Intensität in beiden Hemisphären?
- iii) Existiert eine generelle globale Warmphase um AD 1000  $\pm$  200 Jahre?
- iv) Welche hydrologischen Wechsel (Frequenz und Amplitude) fanden in den letzten 2000 Jahren statt?

Diese offenen Fragen, deren Beantwortung gerade für Hochasien vielfach gefordert wird, sind für die vorliegende Arbeit die übergeordnete Problemstellung. An ihr orientiert sich das Programm von der Datenerhebung über die Auswertung bis zur Interpretation. Im weiteren Sinne ist somit das erklärte Ziel, zu diesem paläoklimatischen Komplex Defizite zu schließen. Bevor die Konzeption und die an sie im engeren Sinne geknüpften Fragestellungen formuliert werden können, sind jedoch zwei Vorbemerkungen essentiell.

Im Gegensatz zu den Standorten an der Nordischen Waldgrenze (SCHWEINGRUBER et al. 1996) kann in Zentralasien auf vergleichsweise geringen horizontalen Distanzen die Variabilität des Klimas in verschiedenen Klimazonen untersucht werden. Durch die extreme Reliefenergie, die steilen

vertikalen klimatischen Gradienten und die – strahlungsbedingt – erhebliche Expositionsdifferenzierung (PAFFEN 1956, SCHWEINFURTH 1956, TROLL 1952) variieren auf engem Raum die ökologischen Standortfaktoren (SCHICKHOFF 1993), oder aus dem dendrochronologischen Blickwinkel die wachstumslimitierenden Faktoren (LA MARCHE 1974), sehr stark. Eine Evaluierung der klimatischen Steuerung des Baumwachstums, ausgedrückt durch die Jahrringbreite, kann nur unter Berücksichtigung der naturräumlichen Gegebenheiten bzw. Gradienten zum Erfolg führen. Sie muß die räumliche klimatisch-ökologische Heterogenität nutzen, um die standörtlichen Unterschiede (z.B. trocken und feucht, warm und kalt) zwischen den Baumbeständen zu maximieren.

Des weiteren stellt sich die Frage, mit welcher Baumart geeignete Klimarekonstruktionen erzielt werden können. In der bis heute meistzitierten Monographie „Tree Rings and Climate“ unterscheidet FRITTS (1976) für dendroklimatologische Studien geeignete von ungeeigneten Baumarten. „*Junipers*“ schneiden dabei schlecht ab. Sie gehören nach FRITTS (1976:12) zu den „troublesome species“, deren Jahrringsequenzen nur mit Abstrichen auswertbar seien. Dies mag ein Grund dafür sein, weshalb Wacholder in Zentralasien, obwohl sie mit bis zu 2000 Jahren zu den ältesten Bäumen der Erde zählen, nur wenig untersucht wurden (BRÄUNING 1994b). Auf der anderen Seite dominieren sie in vielen Regionen ganze Hänge oder Täler von der unteren bis zur oberen Waldgrenze und ermöglichen die Bearbeitung paläoklimatischer Fragestellungen in variierenden standörtlichen Situationen (z.B. untere und obere Waldgrenze), ohne auf verschiedene Baumarten zurückgreifen zu müssen. Das hohe Alter und die Variabilität der Standorte gaben schließlich den Ausschlag dafür, daß fast ausschließlich *Juniperus*-Arten gewählt wurden, um Klimaschwankungen<sup>3</sup> zu rekonstruieren.

Die Konzeption und der Aufbau der Arbeit können nun folgendermaßen zusammengefaßt werden: Die Strategie für die Beprobung berücksichtigt die ökologische Heterogenität der Hochgebirge. D.h. es werden Standorte von der unteren bis zur oberen Waldgrenze, in verschiedenen Expositionen und im NW-Karakorum entlang eines horizontalen Gradienten angelegt. Um das

---

<sup>3</sup> Die teilweise kontrovers geführte Diskussion über die deutschen Begriffe „Klimaschwankungen“, „Klimatrend“, „Klimaänderung“ oder „Klimafluktuation“ wird nicht aufgegriffen. Als Schwankungen werden hier Variationen über eine oder mehrere Dekaden verstanden. Übersichtliche Zusammenfassungen bieten FLOHN (1988:1-8), FRAHM et al. (1997) KRAUS (1984) oder SCHÖNWIESE (1995:7-16).

klimatische Signal<sup>4</sup> im Jahrring vom Rauschen zu trennen (COOK 1992), um Chronologien in verschiedene Frequenzen zu zerlegen (SCHWEINGRUBER et al. 1990, BRIFFA et al. 1996a) und sie klimatisch zu erklären (FRITTS et al. 1992, SCHWEINGRUBER et al. 1991b), werden spezifische statistische Tools verwendet. In Kapitel 2 (Methoden) sind ausschließlich die Verfahren beschrieben, die für das Verständnis der Ergebnisse notwendig sind und deren Operationalität verifizieren. Welche Daten zugrunde liegen (dendrochronologische und meteorologische) und wie sie aggregiert sind, stellt Kapitel 3 (Daten) vor. Hier werden auch die Wachstumsstrategien und phänologischen Merkmale von *Juniperus* sowie eine Typisierung des Wachstums nach Standorten diskutiert. Ein in vielen Arbeiten vernachlässigter Aspekt ist die klare zeitliche Trennung von Signalen im Stammzuwachs und deren Homogenität bzw. Heterogenität. Die Fragen, wie aussagekräftig lokale oder regionale Chronologien und wie stabil die Signale in Abhängigkeit von der Zeit sind, beantwortet Kapitel 4 (Mittel- und langfristige Wachstumsvariationen). Neben den Schwankungen in Dekadenlänge werden hier auch die säkularen Trends, die im Baumwachstum archiviert sind, eingehend diskutiert. Die folgenden Kapitel 5 (Extremjahranalyse) und 6 (Klima/Wachstums-Beziehungen) sind die Kernstücke der Arbeit. Mit der Extremjahranalyse wird untersucht, ob einzelne Jahre klimatisch erklärt werden können, ob in verschiedenen Jahren unterschiedliche klimatische Bedingungen auffallend breite bzw. schmale Jahrringe verursachen und ob bestimmte klimatische Konstellationen an verschiedenen Standorten (z.B. untere und obere Waldgrenze) unterschiedliche Wachstumsreaktionen hervorrufen. Dieser diskontinuierliche Ansatz dient als Plausibilitätskontrolle für die kontinuierliche Zeitreihenanalyse, wie sie Kapitel 6 vorstellt. Hier werden interannuelle und niederfrequente Wachstumsvariationen klimatisch erklärt. Am Ende steht schließlich eine Temperaturrekonstruktion pakistanischer Hochlagenstandorte, von der bekannt ist, welche Bezüge sie zur unteren Waldgrenze oder zu den kirgisischen Standorten besitzt. Die abschließende Zusammenfassung der unterschiedlichen Wellenlängen, also (i) die überregionalen Extremjahre, (ii) die mittelfristigen Wachstumsvariationen und (iii) die säkularen Trends, entwirft ein umfassendes Bild des Paläoklimas im westlichen Zentralasien seit AD 618.

---

<sup>4</sup> Als klimatisches Signal im engeren Sinn wird eine erkennbare Eigenschaft, ein Muster oder eine Streuung in Chronologien (Mittelkurven) verstanden, die in diesem Fall durch ein Klimatelement verursacht wird. Die Diskussion über die Unterscheidung von Signal und Signatur sowie die Auslegung in Europa bzw. Amerika kann hier nicht aufgegriffen werden (KAENNEL et al. 1995).

Die präzisen Fragestellungen der Arbeit lauten demnach:

- i) Sind die untersuchten Baumbestände im pakistanischen NW-Karakorum und kirgisischen Tien Shan (Alaikette) klimatisch sensitiv? Werden also durch klimatische Konstellation synchrone Wachstumsreaktionen verursacht, die zwischen den einzelnen Individuen parallelisierbar sind?
- ii) Variiert die klimatische Sensitivität zwischen den Standorten (z.B. untere und obere Waldgrenze; NW-Karakorum und Tien Shan), und können darüber hinaus an verschiedenen Standorten unterschiedliche Klimaelemente rekonstruiert werden (z.B. untere Waldgrenze = Niederschlagsignal und obere Waldgrenze = Temperatursignal)?
- iii) Können die Zuwachskurven der Bäume in verschiedene Wellenlängen (z.B. interannuelle Variationen und Variationen in Dekadenlänge) zerlegt werden, und gehen von den separierten Frequenzen unterschiedliche klimatische Informationen aus?
- iv) Können auf der Grundlage verschiedener separierter Wellenlängen im Baumwachstum Extremjahre, mittelfristige Variationen und säkulare Trends des Klimas im westlichen Zentralasien einer Zeitscheibe von mehr als 1000 Jahre rekonstruiert werden?
- v) Welche Klimaelemente können auf der Grundlage von Wachstumsvariationen dokumentiert werden, und mit welcher Wahrscheinlichkeit können Jahrringvariationen auf Klimaschwankungen transferiert werden?
- vi) Geht von den Rekonstruktionen der Extremjahre, der mittelfristigen Schwankungen und der säkularen Trends des Klimas eine überregionale Bedeutung aus, oder sind sie eher auf die Untersuchungsregionen im westlichen Zentralasien beschränkt?

## 1.2 Untersuchungsräume und Standorte

Die naturräumlichen Grundlagen, insbesondere die Vegetation sowie die klimatischen Rahmenbedingungen im NW-Karakorum wurden in zahlreichen Arbeiten auch des CAK-Projekts eingehend beschrieben (CRAMER 1994, BRAUN 1996, MIEHE 1991, MIEHE et al. 1996, MILLER 1984, NÜSSER 1998, PAFFEN et al. 1959, REINEKE et al. 1997, SCHICKHOFF 1993, 1995, SCHWEINFURTH 1956, WEIERS, 1995). Spärlicher ist die Literatur in Kirgistan, zumindest wenn dem Leser die russische nicht zugänglich ist. Doch sind auch von dort die wesentlichen physisch-geographischen Einheiten und Interaktionen publiziert (AGACHANJANC et al. 1985, FRANZ 1966, LYDOLPH 1977:151-88, MAMYTOV 1968, OHMURA et al. 1990, SOLOMINA et al. 1994, WALTER et al. 1986:294-361). Im Rahmen dieser Arbeit sollen ausschließlich die für dendroklimatologische Studien relevanten Grundlagen und Zusammenhänge diskutiert werden.

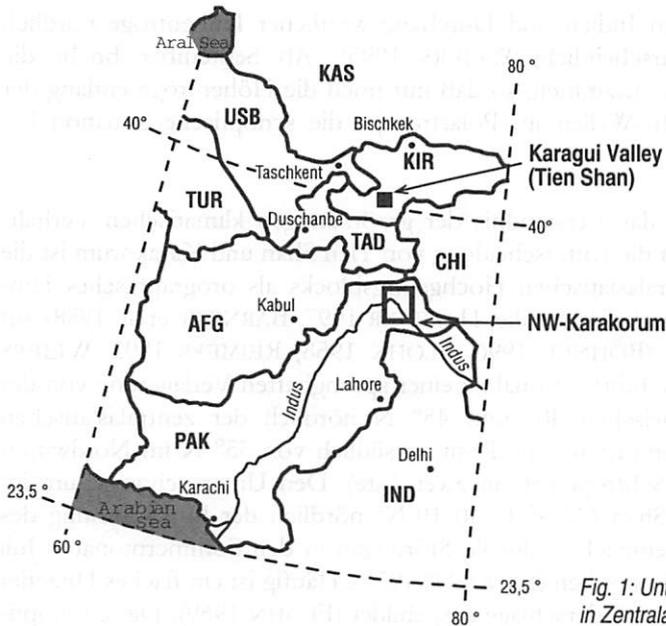


Fig. 1: Untersuchungsregionen in Zentralasien

Die Zielvorgaben können nur durch eine an die naturräumliche Ausstattung adaptierte Beprobungsstrategie erreicht werden. Dies betrifft die Auswahl der Regionen im großräumigen Maßstab ebenso wie die der Standorte innerhalb einer Region. Es wurden Wacholderstandorte im kirgisischen Tien Shan und pakistanischen NW-Karakorum (Fig. 1) gesucht, von denen eine hohe klimatische Sensitivität zu erwarten ist. Diese Strategie ermöglicht telekonnektive Vergleiche zwischen Räumen, die durch unterschiedliche synoptische Systeme geprägt sind.

Die Untersuchungsflächen im NW-Karakorum (74°-76°E und 35°-37°N) liegen im Übergangsbereich vom semihumiden, monsunal geprägten Himalayavorland zu den nördlich anschließenden kontinentalen Steppen. Hier, an der Schnittstelle zwischen Monsunzirkulation und Westwinddrift, treten im Jahresgang gänzlich andere synoptische Situationen auf als im kirgisischen Tien Shan. Im Sommer agieren Kaltluftvorstöße, die in Verbindung mit westlichen Höhentroggen entlang des subtropischen Jetstreams herangeführt werden, gemeinsam mit flachen monsonalen Störungen, die je nach Trogposition durch die großen Täler (Indus, Gilgit River) bis in den NW-Karakorum vordringen können (FLOHN 1970, WEIERS 1995). Dabei scheint eine von FLOHN (1947, 1956) angenommene Interferenz von tropischer und ektrpischer Zirkulation, also dem Zusammenhang feuchtlabil geschichteter

Monsunvorstöße in Indien und Durchzug westlicher Höhenträge nördlich von 35° N, wahrscheinlich (WEIERS 1995). Ab September bricht die Monsunzirkulation zusammen, so daß nur noch die Höhenträge entlang der winterlichen Rossby-Wellen im Polarfrontjet die synoptische Situation bestimmen.

Wesentlich für das Verständnis der großräumigen klimatischen Verhältnisse und somit für die Unterscheidung von Tien Shan und Karakorum ist die Wirkung des zentralasiatischen Hochgebirgsblocks als orographisches Hindernis (und thermische Anomalie, HAFNER 1997, BARNETT et al. 1988) auf die Westwinddrift (BÖHNER 1996, FLOHN 1958, REIMERS 1992, WEIERS 1995). Die Barriere führt saisonal zu einer sprunghaften Verlagerung von der typischen Lage zwischen 40° und 45° N nördlich der zentralasiatischen Hochländer im Sommer in eine Position südlich von 35° N im Nordwinter (Aufspaltung des Subtropenjets in zwei Äste). Den Untersuchungsraum im kirgisischen Tien Shan (72°35'E/40°10'N) nördlich der N-Abdachung des Pamir erreichen demnach zyklonale Störungen in den Sommermonaten Juli bis September äußerst selten (LYDOLPH 1977). Häufig ist ein flaches Hitzetief ohne nennenswerte Niederschläge ausgebildet (FLOHN 1969). Diese synoptischen Rahmenbedingungen begründen eine erhebliche Differenzierung der Untersuchungsregionen aufgrund genetisch unterschiedlicher Niederschläge, die vor allem im Jahresgang zum Ausdruck kommt. So sind in der Beprobungsstrategie, obwohl „nur“ ca. 500 km Luftlinie die Standorte trennen, zwei völlig verschiedene Regionen aufgenommen. Zwischen den Standorten des Karagai Tals im südwestlichen Tien Shan (Alaikette) und denen im NW-Karakorum liegen die Karakorumhauptkette, der westliche Hindukusch und der Pamir. Der Tien Shan bildet den Übergangsraum zu den trockenen, kontinental geprägten Steppen Kasachstans. BÖHNER (1996) stellt an rezenten meteorologischen Meßreihen für Zentralasiens fest, daß der Niederschlag großräumig erheblich stärker variiert als die Temperatur.

Innerhalb der Untersuchungsräume, dem pakistanischen NW-Karakorum und dem Karagai Tal im kirgisischen Tien Shan, herrschen jedoch zahlreiche vergleichbare ökologische Rahmenbedingungen. An den ausgewählten Standorten dominieren *Juniperus* Spezies, es existieren scharfe vertikale Gradienten, an deren Ausprägung eine obere und untere Waldgrenze gekoppelt sind, Walddegradation insbesondere am unteren Saum der Wälder mit abnehmender Intensität in der Höhe und Beweidungsdruck spielt in beiden Räumen eine erhebliche Rolle. Die Waldverbreitung in den Regionen orientiert sich an klimatisch-ökologischen Gradienten, die im Folgenden kurz diskutiert werden sollen. Sie bestimmten die Strategie für die Auswahl der Täler

Land	Tal (Länge/Breite)	Standort	Höhe	Exposition	Neigung	Bodentyp	Baumarten (domin.)
Kirgistan	Karagui (72°-35'/40°-10')	Hoch	3200 m	225°	20°	Ranker	<i>J.turk.</i>
		Mur	3000 m	210°	20°	Braunerde	<i>J.turk.</i>
		Bon	2900 m	360°	25°	Braunerde	<i>J.turk.</i>
		Gef	2900 m	200°	50°	Rendzina	<i>J.turk J.sem. J.ser.</i>
		Art	2600 m	200°	35°	Rendzina	<i>J.turk J.sem. J.ser.</i>
		Kan	2550 m	360°	25°	Braunerde	<i>J.turk.</i>
		Gray	2800 m	270°	20°	Braunerde	<i>J.turk.</i>
Pakistan	Bagrot (74°-35'/36°-02')	Bag1	3100 m	340°	31°	Braunerde	<i>J.exc. P.wall. P.smith.</i>
		Bag2	3300 m	330°	33°	Braunerde	<i>J.exc. P.wall. P.smith.</i>
		Bag3	3750 m	320°	25°	Braunerde	<i>J.turk. P.wall.</i>
		Bag4	3050 m	200°	35°	Lockersyrosem	<i>J.exc.</i>
		Bag5	3750 m	180°	42°	Lockersyrosem	<i>J.turk.</i>
	Chaprot (74°-02'/36°-20')	Chap1	2700 m	180°	31°	Lockersyrosem	<i>J.exc.</i>
		Chap2	3500 m	180°	40°	Syrosem	<i>J.turk.</i>
		Chap3	3900 m	180°	47°	Syrosem	<i>J.turk.</i>
	Morkhun (75°-05'/36°-35')	Mor1	3900 m	225°	30°	Lockersyrosem	<i>J.turk.</i>
		Mor2	3800 m	77°	30°	Lockersyrosem	<i>J.turk.</i>
		Mor3	3600 m	77°	20°	Lockersyrosem	<i>J.turk.</i>
		Mor4	3900 m	157°	22°	Lockersyrosem	<i>J.turk.</i>
	Satpara (75°-30'/35°-10')	Sat1	3300 m	320°	45°	Braunerde	<i>J.exc.</i>
		Sat2	3700 m	180°	45°	Lockersyrosem	<i>J.turk.</i>
		Sat3	3900 m	180°	48°	Lockersyrosem	<i>J.turk.</i>

Tab. 1: Standorte im Tien Shan (Kir) und NW-Karakorum (Pak)

und der Standorte innerhalb der Täler (Tab. 1). Tien Shan und Karakorum sind Gebirge, die seit langem besiedelt sind. Die anthropogene Beeinflussung reicht z.B. im Untersuchungsgebiet des Karakorumgebirges mehrere Jahrhunderte zurück. Der Holzeinschlag nahm insbesondere in den letzten 20 Jahren massiv zu (SCHICKHOFF 1993), wodurch Jahrringmerkmale tangiert sein können. Es ist darauf geachtet worden, diese Wachstumsfaktoren (Freistellung, Verletzung usw.) bereits bei der Probenentnahme auszuschließen.

Die Untersuchungsregion im NW-Karakorum, das Hunza-Gebiet und das 120 km Luftlinie entfernte Satpara Tal, illustriert Figur 2. Sie umfaßt einen Raum zwischen 74°-76°E und 35°-37°N, dem das Nanga Parbat Massiv (8126m NN), ein für Luftmassenbewegungen nicht unerheblicher Riegel, vorgelagert ist. Generell werden die Artverteilung und die Waldverbreitung durch (i) horizontale Gradienten des Niederschlags (inkl. Luv- und Lee-Effekte), durch (ii) vertikale Gradienten des Niederschlags und der Temperatur

und (iii) durch Expositionsunterschiede determiniert. Da die bereits marginale Beeinflussung durch monsunale Störungen nach Norden weiter abnimmt und gleichzeitig die überlagernde Wirkung der Westwinddrift von W nach E sinkt, herrscht innerhalb des Hunza-Karakorums ein negativer, SW/NE-orientierter Niederschlaggradient (WEIERS 1995). Die Standorte im Morkhun Tal sind trockener als die im Chaprot Tal, und die feuchteste Variante ist das Bagrot Tal. Das vom Bagrot ca. 120 km südöstlich entfernte Satpara Tal verbindet das Deosai Plateau mit dem Becken von Skardu. Es liegt in einer typischen Leesituation zum Nanga Parbat Massiv und dem 4000m NN hohen Plateau (Tab. 1 und Fig. 2).

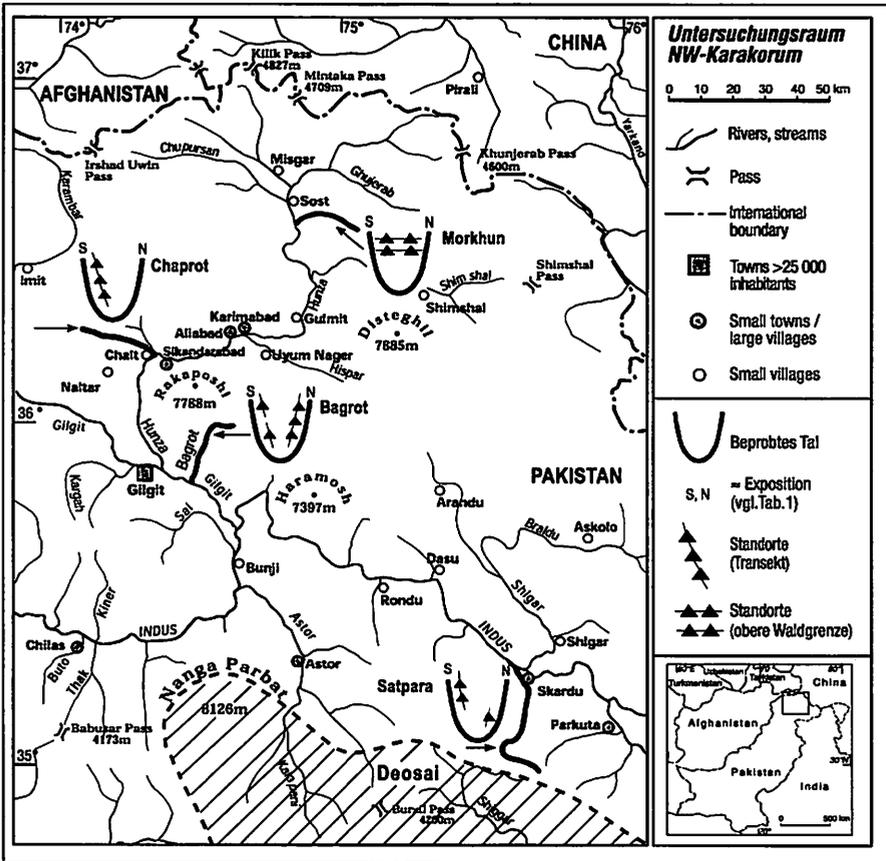


Fig. 2: Beprobungsstrategie im NW-Karakoram

Innerhalb des NW-Karakorums, ebenso wie in der Alaikette des Tien Shan, existiert ein im Sommer intensiviertes, tagesperiodisches Hangwindssystem, das infolge von Winddivergenz und Windkonvergenz in den großen Talschaften zu semiariden Bedingungen auf der Talsohle und nicht linear ansteigenden Niederschlägen mit der Höhe führt (SCHWEINFURTH 1956, TROLL 1952). Die vertikalen Temperatur- und Niederschlaggradienten begrenzen die Waldverbreitung in den Untersuchungsräumen auf einen schmalen Streifen, an dessen Obergrenze Baumwachstum primär durch die Temperatur limitiert wird und an der Untergrenze durch den Niederschlag (SCHICKHOFF 1993, MIEHE et al. 1996). Nahegelegene langjährige Klimastationen, wie Gilgit und Skardu in Pakistan oder Tashkent in Kirgistan, geben somit insbesondere bei den Niederschlägen ein verzerrtes Bild wider. Mit den Arbeiten von CRAMER (1994) und WEIERS (1995) besteht jedoch die Möglichkeit, zumindest für eine kurze Zeitspanne die Ausprägung der Klimaelemente in der Waldstufe des Bagrot Tals zu beschreiben. Während in Gilgit in 1432m NN im langjährigen Mittel 132 mm gemessen werden, fallen oberhalb von 3500m NN 600 mm Niederschlag und mehr. Im Jahr 1991 betrug die mittlere Januar-temperatur in 3780m NN im Bagrot Tal  $-12^{\circ}\text{C}$ , im August  $+12,2^{\circ}\text{C}$ . Leider existieren derartige Daten nicht aus dem Tien Shan, jedoch dokumentiert die imposante Vergletscherung in den Hochlagen beider Gebirge die ausgeprägten vertikalen Gradienten.<sup>5</sup> Durch die vertikale Anordnung der Standorte versucht die Beprobungsstrategie in den Tälern Pakistans und im kirgisischen Karagai Tal die spezifische Steuerung des Wachstums durch die Klimaelemente (Niederschlag nahe der unteren Waldgrenze, Temperatur nahe der oberen Waldgrenze) zu maximieren (Tab. 1). Dabei ist es vom dendroklimatologischen Standpunkt aus nicht relevant, daß die Waldgrenzen im NW-Karakorum (ca. 2700/4000m NN) höher liegen als im Tien Shan (ca. 1800/3200m NN). Wesentlich ist die Ausnutzung der Amplitude von der trocken-warmen bis zur feucht-kalten Limitierung (COOK et al. 1977, LA MARCHE 1974).

Die scharfe Expositionsdifferenzierung gewährt eine weitere Möglichkeit, die Unterschiede zwischen den einzelnen Standorten zu steigern. Die Globalstrahlung ist aufgrund der geringeren Höhenlage der Wälder und der Brei-

---

<sup>5</sup> Die beste Annäherung an die Bedingungen in den Waldbeständen gewährt die Station Naryn ( $76^{\circ}00'\text{E}/41^{\circ}26'\text{N}$ , 2049m NN). Von AD 1886 bis 1970 betrug die mittlere Januar-temperatur  $-17^{\circ}\text{C}$  und die mittlere Augusttemperatur  $+16,9^{\circ}\text{C}$ . Der Niederschlag ist unimodal verteilt, mit Maximum im Juni (51,1 mm) und Minimum im Januar (10,6 mm). Insbesondere die Niederschläge sind nur bedingt auf die Waldstandorte übertragbar.

tenlage der Region im Tien Shan geringer als im Karakorum. Bezogen auf die reale Topographie errechnet CRAMER (1994) für die S-exponierte Waldstufe im pakistanischen Bagrot Tal in den Wintermonaten Strahlungswerte von  $1000 \text{ W/m}^2$  und für die entsprechende N-Exposition weniger als  $300 \text{ W/m}^2$ . Der absolute Strahlungsinput ist für die Waldverteilung und -zusammensetzung von zentraler Bedeutung. An ihn sind verschiedene Standortökologische Parameter geknüpft, von denen für die vorliegende Untersuchung die Schneeschmelze wichtig ist. Geht man davon aus, daß die Schneeniederschläge in den Untersuchungsräumen nur unwesentlich nach der Exposition variieren, bedeutet die nach Exposition differenzierte Ausaperung eine erhebliche Unterscheidung von Sonn- und Schatthängen. CRAMER (1994) gibt für das pakistanische Bagrot Tal eine zeitliche Verlängerung der Schneedecke an N-exponierten Hängen von ca. 3 Monaten an. N-exponierte Standorte sind vor allem im Frühjahr und Frühsommer feuchter als S-exponierte (Tab. 1).

Faßt man die horizontalen und vertikalen Gradienten sowie die Expositionsdifferenzierung zusammen, wird die Idee der Beprobungsstrategie ersichtlich. Im pakistanischen NW-Karakorum ist aufgrund der horizontalen Gradienten eine Einteilung in „trockene“ und „feuchte“ Täler möglich. In den trockenen Tälern Satpara und Morkhun ist *Juniperus* die einzige Baumspesies, die alle Expositionen besetzt. Hier wurden ein vertikaler Transekt (Satpara/3 Standorte) und die vergleichende Beprobung in der Nähe der oberen Waldgrenze (Morkhun/4 Standorte) gewählt. In den feuchten Tälern Chaprot und Bagrot ist die N-Exposition durch feuchttemperierte Koniferenwälder mit *Picea smithiana* (Wallich) Boiss. und *Pinus wallichiana* A.B. Jackson besetzt. *Juniperus* Spezies dominieren alleine auf Sonnenhängen. Die Standortwahl ist an einem N- und S-exponierten Transekt (Bagrot/5 Standorte) sowie ausschließlich S-exponiert (Chaprot/ 3 Standorte) orientiert. Im kirgisischen Karagui Tal (7 Standorte) dominieren Wacholderbäume alle Höhenstufen und Expositionen. Hier wurde die ökologische Spannweite vom tief gelegenen Trockenstandort (ART) bis zum hoch gelegenen Feuchtstandort (HOCH) erfaßt (Tab. 1).<sup>6</sup>

<sup>6</sup> Die Artzusammensetzung innerhalb der Wacholderbestände variiert systematisch. An der unteren Waldgrenze im pakistanischen Untersuchungsraum wachsen mehr *Juniperus excelsa* Bieb., die in der Höhe zunehmend von *Juniperus turkestanica* Kom. abgelöst werden. Im kirgisischen Karagui Tal dominieren an S-exponierten Standorten *Juniperus semiglobosa* Regel und *Juniperus seravchanica* Komarov., die in der N-Exposition durch *Juniperus turkestanica* ersetzt werden. Ebenfalls mit der Höhe steigt systematisch der Anteil an *Juniperus turkestanica*. Die einzelnen Arten sind holzanatomisch nicht zu unterscheiden. Um jedoch eine Verfälschung der Resultate durch artspezifische Re-

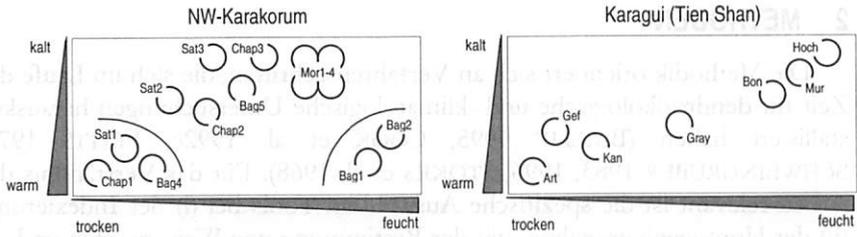


Fig. 3: Ökogramme im NW-Karakorum und Tien Shan

Schließlich ermöglicht diese Unterteilung die Zuordnung der Standorte in Ökogramme<sup>7</sup> (Fig. 3), auf deren Achsen eine relative Einteilung in warm und kalt (Ordinate) bzw. trocken und feucht (Abszisse) aufgetragen ist (SCHWEINGRUBER et al. 1991b). Die relative Achseneinteilung der Ökogramme und somit auch die Stellung der Untersuchungsflächen resultiert aus der standörtlichen Differenzierung nach (i) Exposition, (ii) horizontalen und vor allem (iii) vertikalen Gradienten des Niederschlags und der Temperatur. Die Anordnung im Ökogramm ist nicht absolut aufzufassen. Vielmehr ist die relative klimatisch-ökologische Zuordnung der einzelnen Standorte untereinander wesentlich für das Verständnis und die Interpretation von Wachstumsvariationen. An zwei Beispielen wird die Erstellung und der Nutzen von Ökogrammen deutlich: S-exponierte, tief gelegene Standorte in einem trockenen Tal sind unten links eingetragen, N-exponierte, hochgelegene oben rechts. Von der ersten Gruppierung wird eher ein Niederschlagsignal erwartet, von der zweiten ein Temperatursignal.

aktionen auszuschließen, wird das Wachstum verschiedener Arten im Standort ART (Karagui) verglichen (Kap. 3).

<sup>7</sup> Das Ökogramm aus dem NW-Karakorum dient als Grundlage für die Untersuchung klimatisch gesteuerter Extremjahre des Wachstums in Abhängigkeit von der Standortökologie (Kap. 5.2). Standort Bag3 fehlt, da die Belegungsdichte nicht ausreichend ist.

## 2 METHODEN

Die Methodik orientiert sich an Verfahrensschritten, die sich im Laufe der Zeit für dendroökologische und -klimatologische Untersuchungen herauskristallisiert haben (BAILLIE 1995, COOK et al. 1992c, FRITTS 1976, SCHWEINGRUBER 1983, 1996, STOKES et al. 1968). Für das Verständnis der Arbeit relevant ist die spezifische Auswahl an Tools bei (i) der Indexierung, (ii) der Homogenitätsanalyse, (iii) der Bestimmung von Weiserwerten und (ii-ii) der Kalibration bzw. Rekonstruktion.

Die Felderhebung erfolgte in phytosoziologisch homogenen Plots, in denen mehr als 12 bis > 40 (Standort GRAY, Kirgistan) dominante und subdominante Bäume nach den Kriterien von SCHWEINGRUBER et al. (1992) angebohrt wurden. Präpariert (ISELI et al. 1989, KRUSIC et al. 1987) und inventarisiert (WEBER 1994) werden alle Bohrkerne von der Waldkante (= vor der Probenentnahme zuletzt gebildeter Jahrring eines Baumes) bis zum innersten Jahrring (je nach Bohrung = Kambialalter in Brusthöhe) gezählt. Um fehlende oder gegebenenfalls doppelte Jahrringe zu erkennen, werden auffallende Weiserjahre (SCHWEINGRUBER et al. 1990) nach dem Crossdating-Verfahren (DOUGLASS 1941) notiert. Dieses Vorgehen ermöglicht auch die Überbrückung von Phasen geringen Stammzuwachses, in denen pro Jahrring nur eine bis drei Zellreihen gebildet wurden. Die Variabilität der Jahrringe und makroskopischen Merkmale von *Juniperus* werden anhand von Mikroschnitten (SCHWEINGRUBER 1978) dokumentiert. Die korrigierten Jahrringsequenzen werden dann gemessen. Abweichend von zahlreichen angelsächsischen Arbeiten (COOK et al. 1992c) werden zuerst Baummittelkurven aus den einzelnen Radien errechnet, bevor verschiedene Indexierungsverfahren das klimatische Signal zu betonen versuchen.

### 2.1 Indexierungen

Jahrringsequenzen und meteorologische Meßreihen können standardisiert werden. Dazu werden sogenannte Indexierungsverfahren angewandt, um unterschiedliche Niveaus, also Wachstumsgewindigkeiten oder Niederschlagssummen, vor der Berechnung von Mittelwerten zu normieren und damit vergleichbar zu machen. Geht man davon aus, daß die Breite eines Jahrrings aus dem Zusammenspiel verschiedener endogener und exogener Faktoren resultiert, können in einer idealisierten Betrachtung diese Faktoren zerlegt werden (COOK 1992). Eine an klimatische Fragestellungen adaptierte Ausgleichsfunktion oder Anpassung versucht, die störenden Gehalte in einer Jahrringreihe („Noise“), wie Alterstrend, Bestandeseffekte und andere nicht-klimatische Standorteinflüsse, zu beschreiben und durch Division bzw. Sub-

traktion zu eliminieren. Die resultierenden Wertereihen sind dimensionslose, je nach Multiplikator auf 1 oder 100 normierte Indexserien mit (bei Division) relativ konstanten Varianzen. Die Standardisierung als Division durch ein Modell, das den Noise approximiert, verursacht eine systematische Veränderung der Rohwertkurven, nach der das klimatische Signal belassen wird. Die einzelnen Kurven rücken näher aneinander und ihre hochfrequenten Variationen werden vergleichbar. Schließlich wird in der Index-Mittelkurve eines homogenen, klimasensitiven Standorts das gemeinsame Signal betont.

In der dendrochronologischen Praxis kommen dafür zahlreiche Indexierungen zur Anwendung, die alle Vor- und Nachteile haben (BRÄKER 1981, COOK et al. 1992a, 1992b, FRITTS 1976, RIEMER 1994). Für die Untersuchung einer spezifischen Fragestellung, die Hervorhebung einer bestimmten Wellenlänge bzw. deren Unterdrückung oder die Präparation von Jahrringchronologien zur Kalibration, Verifikation und Rekonstruktion muß der Bearbeiter aus einem Pool hinlänglich diskutierter Standardisierungsverfahren die „richtige(n)“ auswählen. Jedoch sollten bei der Verfolgung des Ziels, die gemeinsamen Variationen hervorzuheben und die individuellen zu minimieren, grundlegende Prinzipien einer Indexierung beachtet werden:

- Nachvollziehbarkeit
- Geringe Entfremdung
- Einheitliche Berechnung der Einzelserien
- Maximale Vergleichbarkeit der Einzelserien
- Anpassung an das Kurvenkollektiv und die Fragestellung

Zu bedenken ist, daß unterschiedliche Indexierungen Signale verschiedener Frequenzen betonen. Um mehrhundertjährige, sog. säkulare Schwankungen in langen Jahrringserien zu belassen, ist eine andere Statistik notwendig, als für die Herausstellung der interannuellen Variationen. In der vorliegenden Arbeit kommen zwei verschiedene Standardisierungen zur Anwendung, (i) die Division bzw. Subtraktion durch den Gesamtmittelwert einer Zeitreihe (=Baummittelkurve) und (ii) die Division bzw. Subtraktion durch modellierte gleitende Mittelwerte.<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> Bei der Kalibration kirgisischer Wacholderstandorte im Karagui Tal werden neben meteorologischen Reihen auch Indexserien der maximalen Dichte von *Picea tienschanica* Rupr. herangezogen (Kap. 6.3). Diese sind an der Eidg. Forschungsanstalt WSL von P. Nogler mit der „Hugershoff-Funktion“, einer forstlich-empirisch ermittelten, deterministischen Trendfunktion aus der Familie der Gammaverteilungen standardisiert worden (BRÄKER 1981:99, RIEMER 1994:214-31).

Division durch den Mittelwert einer Baummittelkurve (*average division, ad*) ist nichts anderes als die Standardisierung von Bäumen unterschiedlichen Wachstums auf ein einheitliches Niveau. Dazu wird die mittlere Wachstumsleistung ( $\chi$ ) der gesamten Serie (Baummittelkurve) von  $i = 1, \dots, n$  Jahren berechnet (mit 1 = Waldkante,  $n$  = innerster Jahrring). Im zweiten Schritt wird jeder Jahrring der Baummittelkurve durch  $\chi$  dividiert, und der resultierende Quotient mit 100 multipliziert. Es entsteht eine Indexserie, deren Gesamtklination oder abrupte Wachstumswechsel mit der Rohwertkurve vergleichbar sind. Insbesondere werden potentielle säkulare Trends nicht tangiert. Durch die Division unterschiedlich großer  $\chi$  wird grundsätzlich die Amplitude der Variationen bei schnellwüchsigen Bäumen verringert und bei langsamwüchsigen vergrößert. Dies begegnet der Annahme, dass Bäume mit breiten Jahrringen a priori absolut größere Schwankungen aufweisen als Bäume mit schmalen. Angewendet wird *ad* ausschließlich auf sogenannte 1000-jährige Wacholder in Pakistan (vgl. Kap. 4.4). Wenn in ihnen ein Signal gespeichert ist, das sich aus Trends über mehrere Jahrhunderte rekrutiert, kann es mit diesem einfachen Verfahren betont werden.

Komplementär zur Division werden bei den Klimaelementen Temperatur und Niederschlag (Monats- und Jahreswerte) verschiedener meteorologischer Reihen Residuen von den jeweiligen Gesamtmittelwerten einer Station gerechnet (*average subtraction, as*). Das Ziel ist, unterschiedliche Stationsreihen zu einer aussagekräftigen regionalen Serie zusammenzufassen (vgl. Kap. 3.2). Im Unterschied zum Jahrring sind erfaßte interannuelle Variationen in den meteorologischen Reihen weitaus unabhängiger. Die Amplituden von den langjährigen Mittelwerten werden durch die Subtraktion nicht tangiert und fließen als originäre Signale in eine Stationsmittelkurve ein.

Modellierte gleitende Mittelwerte<sup>9</sup> sind das zentrale Element der meisten Darstellungen dieser Arbeit (vgl. Kap. 4.1, 4.2, 4.3). Je nach Filterlänge können unterschiedliche Frequenzen betont werden, wobei grundsätzlich zu be-

---

<sup>9</sup> Die Indexierung der Jahrringreihen erfolgt in einem auf dendrochronologische Fragestellungen zugeschnittenen Programmpaket von F. Rinn, Heidelberg (TSAP - Time Series Analysis and Presentation). Die adaptierten gleitenden Filterwerte basieren auf einer gewichteten Kernel Schätzung für optimale, nicht parametrische Regressionsfunktionen. Die Ordnung der Gewichte entspricht der von normalen gleitenden Mittelwerten, wobei die Gewichte selbst aus der Laplace-Funktion abgeleitet sind. Sie erlauben die Anpassung einer Regression mit den Eigenschaften eines Spline. Die Filterung eines Datensatzes funktioniert wie ein gewichteter Filter, mit dem Vorteil, daß die Enden einer Serie nicht abgeschnitten werden müssen. Details können GASSER et al. (1984) entnommen werden.

achten ist, daß Variationen oberhalb der gewählten Filterlänge durch das angepaßte Modell (=Anpassungen) eliminiert werden. Unterschieden werden Modelle der Längen 101 Jahre und 5 Jahre.

Für die Betonung mittelfristiger Wachstumsvariationen (Low-Frequency Signal) wird an jede Baummittelkurve ein gewichteter Filter der Länge 101 Jahre modelliert (GASSER et al. 1984). Die anschließende Division aller Rohwerte einer Serie und Multiplikation mit 100 entspricht *ad*. Diese Form der Standardisierung wird im Folgenden als *8d* bezeichnet.<sup>10</sup> Sie kann nur sinnvoll auf Serien angewendet werden, die länger als 150 Jahre sind, da bei jüngeren Bäumen die Funktion ausschließlich mit der Extrapolation von Trends an den Enden der Serien beschäftigt ist und die Filterlängen verkürzt werden. *8d* nivelliert Schwankungen und Trends oberhalb von 100 Jahren, weitet interannuelle Variationen in geringwüchsigen Phasen (tiefe Kurvenabschnitte der Rohwertserien) auf und reduziert gleichzeitig die Variationen in schnellwüchsigen Perioden. Dadurch wird eine Stabilisierung der internen Variabilität erzielt. Um auszuschließen, daß durch *8d* systematische, langfristige Schwankungen eliminiert wurden, ist eine in vielen Publikationen vernachlässigte Diskussion der angelegten Filter notwendig (vgl. Kap. 4.4). Denn es ist nicht unerheblich, ob innerhalb eines Standorts oder zwischen verschiedenen Standorten parallele oder gegenläufige Trends und Schwankungen bei der Indexierung herausgerechnet wurden. Bei parallelen Kurvenverläufen der Anpassungen besteht die Gefahr, daß klimatische Information und nicht das viel zitierte Rauschen tangiert ist. Anhang I stellt die Rohwertzuwachskurven (jeweils oben) und die *8d*-indexierten Serien (jeweils unten) gegenüber.<sup>11</sup>

Die Betonung der hochfrequenten, interannuellen Variationen kann insbesondere bei der Kalibration von Jahrringchronologien an meteorologischen Meßreihen sinnvoll sein. Dieses Prinzip ist verwirklicht, wenn kirgisische Jahrringbreitenchronologien mit Dichtechronologien und meteorologischen Meßreihen zusammen gebracht werden (vgl. Kap. 6.3). Sowohl bei den Jahrringbreitenchronologien als auch bei den Temperatur- und Niederschlagsreihen werden die Jahreswerte als Residuen von einem kurzen, 5-jährigen glei-

---

<sup>10</sup> Innerhalb des Jahrringlabors an den Geographischen Instituten der Universität Bonn gibt es eine Konvention, nach der Indexierungen mit gleitenden Mittelwerten durch eine Kombination aus einer Zahl plus einem Buchstaben abgekürzt werden. Die Ziffer „8“ steht für eine definierte Filterlänge (101 Jahre) aus einem Pool von stochastischen Adaptionen. „d“ bedeutet, daß durch diesen Filter dividiert wird. Entsprechend steht „15“ für einen 5-jährigen Filter, von den die Originalwerte (1/100 mm) subtrahiert werden.

<sup>11</sup> Weil die Bäume an den kirgisischen Standorten ART und KAN für eine *8d*-Indexierung zu jung sind, illustriert Anhang I von diesen Lokalitäten ausschließlich die Rohwertkurven.

tenden Mittelwert ausgedrückt ( $1s$ ). Alle langfristigen Variationen oberhalb dieser Zeitspanne werden dadurch eliminiert, und lediglich die hochfrequenten Anteile, also die Unterschiede von Jahr zu Jahr, fließen in die vergleichenden Berechnungen ein. Meist werden Korrelations- oder Regressionsberechnungen dadurch schärfer, wobei jedoch der unterschiedliche Einfluß der Autokorrelation zu berücksichtigen ist. In den  $8d$ -indexierten Jahrringbreitenchronologien ist die Autokorrelation 1. Ordnung signifikant positiv. Durch die  $1s$ -Indexierung wird sie bei Lag = 1 signifikant negativ. Die reduzierende Wirkung der Autokorrelation auf die Anzahl der Freiheitsgrade ist grundsätzlich bei Vergleichen zwischen verschiedenen Jahren (z.B. Vorjahreseffekt) zu berücksichtigen. Bei der Anwendung von  $1s$  auf meteorologische Reihen wird i.d.R. aus einer unabhängigen Beobachtung eine Serie mit signifikant negativer Autokorrelation 1. Ordnung, die sich in der 2. Ordnung ins Positive umkehrt.

## 2.2 Homogenität oder Streuung?

Entscheidend bei der Diskussion von Variablenausprägungen, seien es Bevölkerungsdichten oder Jahrringbreiten, ist die Homogenität einer Beobachtung. Diese Sichtweise ist in vielen dendroklimatologischen Arbeiten vernachlässigt. Eine Jahrringchronologie ist nichts anderes als die Aneinanderreihung von Mittelwerten der Breite oder Dichte, als Rohwerte oder indexiert. Durch die Anordnung entlang einer Zeitachse entsteht von jedem Jahr zum Folgejahr ein Intervall, dessen Vorzeichen und Amplitude die Kurvendiskussion ermöglichen. Die Abfolge von Jahrringbreiten innerhalb einer Zeitreihe, also die Informationsweitergabe entlang der x-Achse, kann je nach Kurvenversatz zu sich selbst durch die Autokorrelation ausgedrückt werden (FRITTS 1976). Indexierungsverfahren reduzieren die Streuung der Mittelwerte und beeinflussen die Autokorrelation. Die Vorzeichen der Intervalle hingegen bleiben meist unberührt.

Generell muß bei der Betrachtung von Homogenität oder Streuung unterschieden werden, ob einzelne Radien zu einer Baummittelkurve, die Bäume eines Standorts zu einer Standortchronologie oder verschiedene Standorte zu einer regionalen Chronologie zusammengefaßt werden. Unabhängig davon, welcher dieser Fälle besprochen wird, ist die Homogenität, mit der einzelne Serien oder Chronologien gemittelt werden, von entscheidender Bedeutung für die neu entstandene Kurve. Dies bezieht sich auf alle Signale, ob hoch- oder niederfrequente, die dann diskutiert werden. So dient die Homogenität als Kriterium für die Selektion von Einzelbäumen, wenn diese von einem potentiellen kollektiven Standortsignal abweichen. Bäume mit derartigen Zuwachskurven, in denen individuelle Reaktionen die kollektiven überlagern,

treten trotz sorgfältiger Beprobungsstrategie und Auswahl im Gelände immer wieder auf. Ist eine Standortchronologie aus indextierten Einzelserien berechnet, muß die Homogenität der gesamten Serie und die Stabilität dieser in Abhängigkeit von der Zeit dokumentiert oder gesichert sein. Es reicht nicht aus, für eine Standortchronologie einen Wert  $x$  anzugeben, der die mittlere Homogenität beschreibt. Wesentlich ist, ob diese Homogenität z.B. im 19 Jh. der des 18 Jh.s entspricht oder von ihr abweicht. Weit verbreitet hingegen sind Ähnlichkeitsanalysen zwischen einzelnen Standortchronologien, die meist durch herkömmliche Zusammenhangsmaße ausgedrückt werden.

Als Selektionskriterien für die Ausscheidung einzelner Bäume vor der Berechnung von Standortmittelkurven werden in der vorliegenden Arbeit  $t$ -Werte nach Holstein und Bailli-Pilcher (BAILLIE et al. 1973, RIEMER 1994:27-41), die Gleichläufigkeit (GLK) (HOLSTEIN 1980) in Abhängigkeit von der Länge der Serien und die visuelle Kontrolle verwendet. Eine generelle Angabe von kritischen Werten, unterhalb derer ein Baum selektiert wird, ist zwar nur bedingt möglich, da die Signifikanzen mit dem Alter variieren. Jedoch sollten die  $t$ -Werte nicht unter 3 bis 4 absinken und die GLK mindestens 60% betragen. Entscheidend aber ist die nachträgliche visuelle Überprüfung, bei der jeder einzelne Baum mit dem Kurvenkollektiv eines Standorts verglichen wird. Gemeinsam mit der Begutachtung der entsprechenden Bohrkerne (Reaktionsholz, Kallusgewebe usw.) kann sie eine Selektion fundiert begründen oder verwerfen.

Für die Dokumentation der Homogenität innerhalb von Standortchronologien existieren in der Literatur zahlreiche, teilweise sehr komplexe Maße, wie SNR (Signal to Noise Ratio) oder EPS (Expressed Population Signal) (BRIFFA et al. 1992a). Die meisten sind jedoch für den vorliegenden Datensatz, der sich aus sehr unterschiedlich alten, rezenten Hölzern rekrutiert, unbrauchbar. Um die Homogenität als mittlere Maßzahl anzugeben, werden deshalb der Variationskoeffizient (BAHRENBERG et al. 1985) und die Gleichläufigkeit (HOLSTEIN 1980) herangezogen. Zusätzlich zeigt der Variationskoeffizient, wenn er für jedes einzelne Jahr berechnet wird, als „Homogenitätskurve“, in welchen Zeitfenstern die Streuung zu- oder abnimmt.<sup>12</sup> Auf diese Weise entsteht ein umfassendes Bild von den Standortchronologien, das

---

<sup>12</sup> Aufgrund der Normierung des Variationskoeffizienten am Mittelwert (Standardabweichung eines Jahres dividiert durch mittlere Ringbreite des Jahres) ist dieses Maß unabhängig von der mittleren Breite des entsprechenden Jahrrings. Allerdings treten beim Grenzwertverhalten gegen Null systematisch höhere Werte auf. Die Untersuchung dieses Phänomens an Rohwerten und Indizes (negative Exponentialfunktion) ist in Bearbeitung. Bei geringerer Belegungsdichte in älteren Kurvenabschnitten einer Chronologie (insbesondere unterhalb von  $n = 5$  Bäumen) verliert der Variationskoeffizient an Aussagekraft (SHIYATOV et al. 1992).

diskutiert, mit welcher Intensität eine Mittelkurve die Einzelserien widerspiegelt und ob die Homogenität in den verschiedenen Jahrhunderten stabil ist.

Vergleiche zwischen Standortchronologien werden auf der Grundlage des Produktmoment-Korrelationskoeffizienten nach Pearson ( $r$ ) durchgeführt (BAHRENBURG et al. 1985). Im Gegensatz zu den Einzelserien eines Standortes besitzen die Chronologien durchweg eine ausreichende Länge, so daß die Berechnung von  $r$  in einem definierten Zeitfenster zu aussagekräftigen Resultaten führt. Auf diese Weise können Kreuzkorrelationen berechnet werden, in denen alle Serien die gleiche Länge besitzen und für die aus standardisierten Tabellen (BAHRENBURG et al. 1985:222) die entsprechenden Signifikanzen hervorgehen. In Einzelfällen, z.B. beim Vergleich von Chronologien aus dem NW-Karakorum und dem Tien Shan, wird  $r$  in einem Gleitfenster von 15 Jahren berechnet, das entlang der zu vergleichenden Serien geführt wird ( $r_{1907}$  des Zeitfensters AD 1900-1914,  $r_{1908}$  des Zeitfensters AD 1901-1915 usw.).

### 2.3 Weiserwerte

Der Ansatz, Extremjahre wieder verstärkt in die dendroklimatologische und -ökologische Praxis einzubeziehen, geht auf Schweingruber zurück (SCHWEINGRUBER 1996:480-511, SCHWEINGRUBER et al. 1991b). Aus der Fülle an Methoden, die für die Bestimmung von Extremjahren existieren, wird in der vorliegenden Studie ein Ansatz auf der Grundlage von CROPPER (1979) gerechnet (zu Verfahren und Nomenklatur vgl. KAENNEL et al. 1995). Dieses Verfahren hat gegenüber der visuellen Evaluierung von Weiserjahren nach SCHWEINGRUBER et al. (1990) den Nachteil, daß Merkmale wie Reaktionsholz, Dichteschwankungen, abrupte Zuwachsänderungen, Harzkanäle usw. nicht oder nur unzureichend erfaßt werden. Die Überlegenheit des Auges gegenüber reduzierten metrischen Größen, die mit Hilfe des Computers statistisch ausgewertet werden können, ist nach wie vor evident. Jedoch ermöglicht alleine die statistische Ableitung von Extremjahren aus gemessenen Jahrringserien die Bearbeitung eines derart großen Datensatzes, wie er in diesem Fall vorliegt. Die Berechnung von Extremjahren ersetzt nicht das Cross-dating (ESPER et al. 1995). Sie wird an korrigierten und richtig datierten Reihen im Nachhinein vorgenommen.

Die Idee von Cropper-Weiserwerten ist, einzelne Kurvenausschläge der Jahrringbreite in Beziehung zu den benachbarten Jahrringen zu setzen. Jeder Jahrring einer Sequenz wird sozusagen auf sein „Ausreißerverhalten“ überprüft. Diese Überlegung wird hier auf jede Baummittelkurve im kirgisischen und pakistanischen Datensatz angewandt. Es entstehen dimensionslose

Wertereihen, die allen Jahrringen eines Baumes einen Wert ( $C_i$ ) für die Abweichung von den umgebenden zuordnen.

Zunächst wird jede Rohwert-Baummittelkurve durch die Subtraktion von einem 5-jährigen gleitenden Mittel trendeleminiert (vgl. Kap. 2.1:  $\alpha$ -Indexierung). In den resultierenden Residuen  $a_i$  ist allein das hochfrequente Signal enthalten. Anschließend wird jeder Indexwert  $a_i$  durch die Standardabweichung der gesamten Reihe (indexierte Baummittelkurve) dividiert ( $\text{std}_{v_{i=1, \dots, n}}$ ). Auf diese Weise wird die Indexserie eines Baumes auf seine eigene Standardabweichung bezogen. Die Idee, die sich dahinter verbirgt, ist, Bäume mit unterschiedlich „unruhigen“ Zuwachskurven zu vereinheitlichen. Ausreißende Indizes von Bäumen mit einer insgesamt hohen Standardabweichung werden abgewertet und umgekehrt. Schließlich bleibt als resultierende Größe pro Jahrring eine Zahl, die ausdrückt, ob ein Jahr aus seinem näheren Umfeld tatsächlich „herausragt“, also als extrem zu bezeichnen ist oder nicht. Man erhält diese Information als Sequenz von jedem Baum. Die abschließende Multiplikation mit einem Skalierungsfaktor (\*1000) bedeutet lediglich eine Verschiebung der Kommastelle [ $C_i = 1000 * a_i / \text{std}_{v_{i=1, \dots, n}}$ ].

Die so berechneten Sequenzen von Ereigniswerten pro Baum werden dann zu Standortsequenzen gemittelt (Weiserwerte,  $C_m$ ). Es entstehen Abfolgen von  $C_m$ -Werten, die tatsächlich die Extremjahre innerhalb des jeweiligen Standorts widerspiegeln, wie exemplarische Vergleiche mit visuell ermittelten Weiserjahren (SCHWEINGRUBER et al. 1990) ergaben. Dieses Verfahren ist der Berechnung von Weiserintervallen (= % negative Intervalle im Verhältnis zu den positiven in einem Jahr) vorzuziehen, da bei der Relation von Vorzeichen extreme Jahre immer auch einen Resonanzeffekt verursachen. Auf ein negatives Extremjahr mit negativen Intervallen zum Vorjahr folgt zwingend ein positives Intervall, auch wenn der anschließend gebildete Jahrring „normal“ gewachsen ist.

## 2.4 Kalibration und Rekonstruktion

Jahrringvariationen können mit einem oder mehreren Umweltfaktoren, von denen eine Beeinflussung des Wachstums erwartet wird, korreliert werden (Kontinuierliche Zeitreihenanalyse). Bei dendroklimatologischen Studien, in denen die Sammelstrategie die Steuerung der kambialen Aktivität durch die Temperatur und den Niederschlag zu maximieren versucht, ist es möglich, ein statistisches Klima/Wachstum-Modell zu kalibrieren. Die so kalkulierte Transferfunktion kann in verschiedenen unabhängigen Zeitabschnitten überprüft oder verifiziert werden, um die Stabilität des Modells zu testen. Ein derartiges Modell beschreibt den vereinfachten funktionalen Zusammenhang zwischen Jahrringvariationen und Variationen der Temperatur bzw. des Nie-

derschlags, wobei nie alle Anteile des Jahrringsignals erklärt werden können. Für die Rekonstruktion werden die Jahrringvariationen zum Prädiktor, der in Form einer Schätzfunktion Klimaschwankungen weit über den Zeitraum meteorologischer Meßreihen hinaus nachzeichnet (FRITTS et al. 1992).

Grundlage für die Berechnung des Zusammenhangs zwischen Klimaelementen und Jahrringbreitenindizes an den zentralasiatischen Standorten sind auch hier Produktmoment-Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) (BAHRENBERG et al. 1985). Wenn man sich der Abhängigkeiten innerhalb der Datensätze bewußt ist und dies bei der Diskussion berücksichtigt, bestehen gegenüber den komplexen, schrittweise multiplen Ansätzen wie den Response Functions (FRITTS 1976) keine Nachteile.<sup>13</sup> Korreliert werden standardisierte Ringbreiten mit (i) Monatswerten der Temperatur und des Niederschlags, (ii) mit entsprechenden Jahreswerten und (iii) mit Dichteindizes von *Picea tienschanica* Rupr. aus Kirgistan (vgl. Kap. 6.1, 6.2, 6.3). Es entstehen Histogramme, aus denen die Limitierung des Wachstums durch die Klimaelemente in Abhängigkeit von der Jahreszeit hervorgeht. Mit  $r$  wird i.d.R. der Zusammenhang zwischen den hochfrequenten, interannuellen Variationen (Jahrring und Klima) abgeschätzt. Rekonstruiert werden jedoch meist Low-Frequency Variationen. Deshalb werden in der vorliegenden Studie neben der Kalkulation des Zusammenhangs im hochfrequenten Bereich auch die niederfrequenten Signale der Jahrringbreite und der Temperatur bzw. des Niederschlags korreliert. Verglichen werden 15-jährige Filter von Jahrringchronologien und Variablen des Klimas (Filterkorrelation). Darüber hinaus wird  $r$  genutzt, um in einem gleitenden Zeitfenster (15 Jahre) die zeitliche Stabilität eines Zusammenhangs zu evaluieren (Gleitfensterkorrelation).

Die Korrelationskoeffizienten bilden die Grundlage für die Berechnung linearer Einfachregressionen (BAHRENBERG et al. 1985) zwischen der Jahrringbreite und der regionalen Jahresmitteltemperatur in Pakistan. Auch hier wird die Abhängigkeit zwischen Filtern, also das Low-Frequency Signal, kalkuliert. Durch die Berechnung in verschiedenen unabhängigen Zeitabschnitten sind alle Kriterien der Kalibration, Verifikation und Rekonstruktion erfüllt. Schließlich kann mit einer operationalisierten Sicherheit oder Unsicherheit, also dem erklärten Anteil der Varianz an der Gesamtvarianz, die Temperatur rekonstruiert werden (vgl. Kap. 6.4). Bei allen Berechnungen ist die Art der Indexierung zu bedenken, die den Grad der Autokorrelation in den Datensätzen nachhaltig beeinflusst. Hohe Autokorrelationen reduzieren die Zahl der Freiheitsgrade (COOK et al. 1977).

<sup>13</sup> In der neueren Literatur (z.B. BRIFFA et al. 1996b, 1998a, 1998b) ist ein Trend zu einfachen Berechnungen erkennbar. Die Zeit, in der die Dendroklimatologie mit komplizierten Verfahren Bezüge zu Umweltfaktoren herstellte, scheint auszuklingen.

### 3 DATEN

Zwei Datensätze fließen in die Studie ein, (i) die selbst erhobenen Jahringparameter von 23 Standorten in Pakistan und Kirgistan sowie (ii) die Klimatelemente Temperatur und Niederschlag von 7 Klimastationen.<sup>14</sup> Um die Frage zu klären, wie die Bäume in Abhängigkeit der klimatisch-ökologischen Parameter wachsen und ob gegebenenfalls typische Wachstumsmuster erkennbar sind, muß eingangs diskutiert werden, ob von den einzelnen Wacholderarten (*J. excelsa* Bieb., *J. turkestanica* Kom., *J. seravchanica* Komarov. und *J. semiglobosa* Regel) grundsätzlich unterschiedliche Reaktionen ausgehen. Ist dies auszuschließen, können die verschiedenen *Juniperus*-Spezies gemeinsam behandelt werden. Ihre Adaptionsmechanismen an die Standortbedingungen und charakteristischen makroskopischen Merkmale im Jahringbild diskutiert Kapitel 3.1.1. Danach wird das Wachstum innerhalb der Standorte typisiert (Kap. 3.1.2). Kapitel 3.2 stellt schließlich die meteorologischen Meßreihen vor und bespricht, wie sie für den Klima/Jahring-Vergleich aggregiert werden.

#### 3.1 Dendrochronologische Daten

Außer den Standorten im N-exponierten Transekt des Bagrot Tals, an denen auch *Pinus wallichiana* A.B. Jackson und *Picea smithiana* (Wallich) Boiss. beprobt wurden (Tab. 1), fließen ausschließlich *Juniperus*-Spezies in die Untersuchung ein. Innerhalb dieser Gattung variiert jedoch die Artzusammensetzung, weshalb zunächst eine potentiell mögliche endogene Beeinflussung des Wachstums durch die Variable Baumart analysiert und gegebenenfalls ausgeschlossen werden muß. Generell sind Unterschiede in einem Datensatz natürlich leichter zu beweisen als Gleichheit. Dabei ist der Vergleich einzelner Wacholderarten von verschiedenen Standorten wenig hilfreich, da divergierende Wachstumsverläufe auch auf die Ökologie der Standorte zurückgeführt werden können. Deshalb sind in den kirgisischen Standorten GEF und ART (Tab. 1) *Juniperus semiglobosa* Regel, *J. seravchanica* Komarov. und *J. turkestanica* Kom. unterschieden worden, um sie systematisch auszuwerten. Die entsprechenden Zuwachskurven gehen aus Anhang I hervor (GEF: Rohwerte und *8d*-indexiert).

Holzanatomisch sind alle untersuchten Wacholderarten identisch. Jedoch gehen von einzelnen Arten unterschiedliche Standortansprüche aus, weshalb sie innerhalb der Untersuchungsregionen systematisch verteilt sind. So bevorzugt *Juniperus turkestanica* tendenziell kältere und feuchtere Standorte, *Juniperus*

---

<sup>14</sup> Die meteorologischen Meßreihen gehen auf verschiedene Quellen zurück, die von Dr. J. Böhner im Rahmen einer Dissertation zusammengestellt, überprüft und homogenisiert wurden (BÖHNER 1996).

*excelsa* wärmere und trockenere. Die Jahrringparameter allgemein und insbesondere die Zuwachsverläufe unterscheiden sich jedoch nicht. Dies ergeben visuelle und statistische Untersuchungen an *Juniperus turkestanica*, *semiglobosa* und *seravchanica* an den Standorten GEF und ART. Beobachtet werden Jahrringbreiten, Dichteschwankungen, Spätholzbreiten, Reaktionsholz, Extremjahre und abrupte Wachstumswechsel.

Exemplarisch sollen hier die Rohwertkurven (1/100 mm) von *Juniperus semiglobosa* und *Juniperus seravchanica* im Standort ART diskutiert werden. Figur 4 zeigt die radialen Zuwächse von 14 *Juniperus semiglobosa* (oben) und 11 *Juniperus seravchanica* (unten) von AD 1900 bis 1995 (vgl. Anhang I). Dargestellt sind die individuellen Kurvenverläufe (dünne Linien), die Mittelkurve aus diesen (dicke gezackte Linie) und ein 15-jähriger Filter der Mittelkurve<sup>15</sup> (dicke glatte Linie). Die mittleren Serienlängen an diesem Standort betragen 97 Jahre (*semiglobosa*) bzw. 93 Jahre (*seravchanica*). Von den beprobten Bäumen wächst *Juniperus semiglobosa* mit einer mittleren Geschwindigkeit von 1,08 mm pro Jahr, *Juniperus seravchanica* mit 1,12 mm. Aus Figur 4 geht hervor, daß die Wachstumsgeschwindigkeiten in den beiden Arten vergleichbar streuen und die Sensitivität, also die Variationen von Jahr zu Jahr, ähnlich ist. Nur vereinzelte Serien oder Abschnitte von Serien zeigen eine deutlich erhöhte kambiale Aktivität.

Obwohl Mittelkurven aus Rohwerten grundsätzlich problematisch sind, weisen die hochfrequenten Variationen (im Vergleich zu den Filtern; dicke glatte Kurve) auf die Homogenität zwischen den Arten hin. Zwischen AD 1910 und 1918 ist sowohl bei *J. semiglobosa* als auch bei *J. seravchanica* eine charakteristische Abfolge von schmalen und breiten Jahrringen zu erkennen. Die Abweichungen (dicke gezackte Kurve) von den Filtern sind nahezu identisch. Gleiches gilt für die Überschreitungen AD 1952-55, 1966-68 und Unterschreitungen AD 1973-75, 1984-86. AD 1917 ist in beiden Arten ein extrem negatives Weiserjahr, das an diesem Standort zu zahlreichen „missing rings“ geführt hat. Von insgesamt 14 *J. semiglobosa* und 11 *J. seravchanica* ist jeweils nur bei dreien ein Jahrring ausgebildet. Für fehlende Jahrringe wird (grundsätzlich) der Wert 0,01 mm eingetragen.

Bei näherer Betrachtung werden weitere Übereinstimmungen evident. Die Wacholderarten zeigen keine artspezifischen Reaktionen, die Streuung der Rohwerte ist ausgeglichen und die Ausprägung der Jahrringmerkmale insgesamt kann nicht unterschieden oder gar einzelnen Arten zugeordnet werden.

<sup>15</sup> Die Filter resultieren aus ungewichteten gleitenden Mittelwerten, die an den Kurvenenden sukzessive bis auf 8 Jahre verkürzt werden (Mittel<sup>1995</sup>: einseitiger Filter der Jahre 1988 bis 1995). Aufgrund der Filterverkürzung können die geglätteten Kurven an den Enden unruhiger erscheinen.

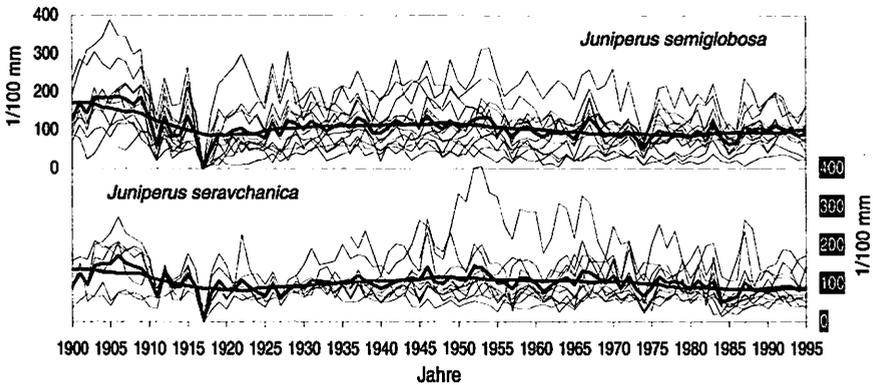


Fig. 4: *Juniperus semiglobosa* und *Juniperus seravchanica* im Vergleich

Dies ist auf alle anderen Standorte übertragbar. Eine geeignete Indexierung zeigt, daß die angesprochenen Variationen (von den Filtern) homogene Reaktionen auf Umweltbedingungen sind, durch die keine artspezifische Grenze verläuft (ohne Figur).

Ein Vergleich zwischen ART und GEF belegt, daß die Unterschiede zwischen den Standorten weitaus größer sind als innerhalb der Standorte bzw. zwischen den Arten eines Standortes. Im S-exponierten Tieflagenplot ART ist die Sensitivität höher und das Crossdating funktioniert deutlich besser als im steilen und in sich sehr heterogen aufgebauten Standort GEF. An beiden Standorten wurden die gleichen Arten erhoben.

### 3.1.1 Wachstumsstrategien und phänologische Merkmale

Wacholderbäume, die zentrale Spezies dieser Arbeit, wachsen an „extremen“ Standorten. Dies gilt primär für den Strahlungsinput, an den die räumliche Verteilung und rasche Ablation der Schneedecke geknüpft ist. In den pakistanischen Talschaften Bagrot und Chaprot ist *Juniperus* die einzige Spezies, die fast unbedrängt die strahlungsintensive S-Exposition besetzt. In der feuchten N-Exposition tritt sie mit *Picea smithiana* (Wallich) Boiss. und *Pinus wallichiana* A.B. Jackson in Konkurrenz, die hier waldbildend sind. In trockeneren Tälern, wie dem kirgisischen Karagui und den pakistanischen Morkhun und Satpara, dominieren sie alle Expositionen. Wacholder wachsen an steilen Hängen, auf bewegtem Untergrund und an stark windexponierten Standorten. Mancherorts sind sie die einzige Baumgattung, die von der unteren bis zur oberen Waldgrenze gedeiht. Dabei stehen sie in vergleichsweise großen Abständen zueinander. Nicht selten sind in den offenen Beständen Distanzen von mehr als 10 m von einem Individuum zum nächsten zu beobachten.

*Juniperus excelsa*, *J. turkestanica*, *J. semiglobosa* und *J. seravchanica* sind vom Habitus ähnlich. In den ökologischen Nischen, in denen die *Juniperi* waldbildend sind, adaptierten die Bäume in vorzüglicher Weise an das Environment. Sie sind i.d.R. kleiner als 20 m, häufig mehrstämmig und von karger Gestalt. Große Wurzelsysteme verankern sie im Untergrund, sorgen für ausreichende Stabilität und eine optimale Ausnutzung des Wasser- und Nährstoffangebots. Wahrscheinlich sind die großen Abstände zwischen den Bäumen durch das Wurzelsystem zu begründen, das neben Konkurrenz aber auch Möglichkeiten zur Kooperation bietet.

Die Kronen, meist aufgebaut aus aufstrebenden Ästen, sind vielfach deformiert oder zu großen Anteilen abgestorben. Überhaupt wirken manche der alten Wacholder wie um das Überleben kämpfende Individuen, an denen die toten Stamm- und Kronenanteile überwiegen. Das Kambium (zur Zellteilung befähigtes meristematisches Gewebe zwischen sekundärem Xylem und sekundärem Phloem, KAENNEL et al. 1995) ist abgestorben und umgibt den Stamm nur noch partiell. Mechanische Verletzung aufgrund von Steinschlag ist wahrscheinlich die Ursache. Das Rücksterben ist in manchen Fällen so weit fortgeschritten, daß nur noch ein schmaler Streifen des lebenden Gewebes vorhanden ist. Dieses Phänomen, daß von der *Bristlecone pine* aus dem SW der U.S.A. bekannt ist (FERGUSON 1968, FRITTS 1969, WRIGHT et al. 1965), ging als „strip bark formation“ in die Literatur ein (KELLY et al. 1992). Die Bäume sterben auf der einen Stammseite ab, gedeihen jedoch regelrecht in andere Richtungen. Verstärktes Wachstum aufgrund der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Düngung seit der Industriellen Revolution, wie es GRAYBILL et al. (1993) in strip barked trees feststellen, konnte in den zentralasiatischen Wachholdern allerdings nicht nachgewiesen werden (ESPER et al. 1995).

Figur 5 zeigt den idealisierten Stammquerschnitt eines strip barked Wacholders. Charakteristisch ist die spannrückige Form, die aus unterschiedlichen Zellteilungsraten an verschiedenen Radien resultiert. So ist in manchen Richtungen ausgehend vom Zentrum (Mark) die kambiale Aktivität reduziert (Fig. 5: Kreis A), während an benachbarten Radien zeitgleich breitere Jahrringe wachsen (Fig. 5: Kreis B). Die Gründe dafür sind unbekannt (SCHWEINGRUBER 1996), jedoch ist diese Wuchsform als Adaptionsstrategie an die Hochgebirgsstandorte anzusehen, die mit zunehmendem Alter zu teilweise bizarren Querschnitten führt. Die Wahrscheinlichkeit für fehlende Jahrringe oder Perioden, in denen nur wenige Zellreihen gebildet werden und Zuwächse nicht mehr einzelnen Jahren zugeordnet werden können, ist an den Einkerbungen (Fig. 5: einfacher Pfeil) größer als an den Loben (Fig. 5: doppelter Pfeil). Daher werden Bohrkerne nie an Stammstellen genommen, an denen „von Außen“ eine dramatische Zuwachsreduktion vermutet werden

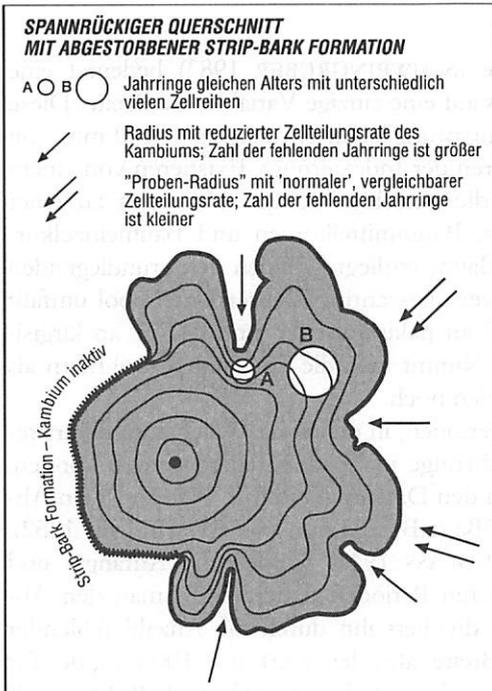


Fig. 5: Idealisierte Stammscheibe eines Wacholders

kann. Allerdings sind vor allem bei alten Wachholdern auch an „Lobus-Radien“ (Fig. 5: doppelter Pfeil) die Zuwächse derart gering, daß kontinuierliche, datierte Zeitreihen nur durch die Verwendung von Weiserjahrkatalogen (SCHWEINGRUBER et al. 1990) entstehen können.

Neben den Perioden mit nicht mehr differenzierbaren Jahrringen und „Missing Rings“ treten weitere typische makroskopische Merkmale auf, die das Wachstum der zentralasiatischen Wachholderarten prägen (ESPER 1994). Typisch sind Dichteschwankungen, die artübergreifend an fast allen Standorten nachgewiesen werden können und die Datierung erschweren. Diese Doppeljahrringe oder falschen Jahrringe können in vielen

Fällen synchronisiert werden (z.B. AD 1895), treten jedoch auch bei einzelnen Individuen auf, ohne vom Kollektiv bestätigt zu werden. Systematische Dichteschwankungen gelten, je nach Standortfaktoren, als Indizien für Niederschläge als herrschende Agenzien (SCHWEINGRUBER 1992). Haselwuchs und schräges Wachstum, wenn die Zellreihen nicht senkrecht zwischen den Jahrringgrenzen verlaufen, erschweren in einigen Fällen zusätzlich die exakte Messung der Bohrkerns. Im Vergleich zu häufiger verwendeten Baumarten sind die hier untersuchten *Juniperi* nur mit einem erhöhten Zeitaufwand auswertbar. Die wenigen sekundär verdickten Zellreihen im Spätholz lassen die Eignung für densitometrische Untersuchungen zumindest fraglich erscheinen. Dies trifft insbesondere auf die tausendjährigen Wachholder zu, deren jährliche Zuwächse in vielen Phasen auf eine oder wenige Zellreihen begrenzt sind. Vergleichbare Einschränkungen gelten für Isotopenanalysen.

### 3.1.2 Typisierung des Wachstums

Das Messen der Jahrringbreite (SCHWEINGRUBER 1983) bedeutet eine Reduktion des Informationsgehalts auf eine einzige Variable, die Breite. Diese liegt als Sequenz zunächst in der ursprünglichen Dimension 1/100 mm von jedem Bohrkern vor (ohne Verfahren der Indexierung). Existieren von einem Baum mehrere Proben, werden die einzelnen Radien als erstes zu einer Baummittelkurve zusammengefaßt. Baummittelkurven und Baumeinzelkurven – wenn nur ein Bohrkern je Baum vorliegt – bilden den grundlegenden Datensatz für alle folgenden Auswertungsschritte. Dieser Datenpool umfaßt 148.684 Jahrringe, wovon 103.907 an pakistanischen und 44.777 an kirgisischen Bäumen gemessen wurden. Nimmt man die Jahrringe je Bohrkern als Grundlage, erhöhen sich diese Zahlen noch.

Die vielfach angesprochenen Perioden, in denen das Wachstum derart reduziert ist, daß keine einzelnen Jahrringe mehr identifiziert werden können, gehen als sogenannte „Plateaus“ in den Datensatz ein. Ein Plateau ist ein Abfolge von Ringbreiten gleicher Größe (z.B. 0,03 mm von AD 1831 bis 1852). Mit Hilfe des Crossdatings (DOUGLASS 1941) werden die Anfangs- und Endpunkte der nicht identifizierbaren Perioden datiert. Mißt man den Abstand einer Reduktionsphase und dividiert ihn durch die Anzahl fehlender Jahrringe, ergibt dies die mittlere Breite, also den Wert in 1/100 mm, der für ein Plateau in den Computer eingegeben wird (vgl. Anhang I, Rohwerte).<sup>16</sup> Dieses Verfahren hat den Vorteil, daß alle hier diskutierten Serien kontinuierlich ohne Unterbrechungen sind. Bei der Berechnung von Ähnlichkeitsmaßen zwischen den Bäumen wie beispielsweise der Gleichläufigkeit (GLK) sind Plateaus zu berücksichtigen, da sie die Kennwerte meist reduzieren.

Tabelle 2 stellt die wesentlichen dendrochronologischen Angaben der Standorte im kirgisischen Karagai Tal und im pakistanischen NW-Karakorum vor. Die entsprechenden Rohwerteinzelkurven sind im Anhang I zusammengefaßt. Gegenüber Tabelle 1 ist in dieser Darstellung noch der „Standort“ HUN beigefügt worden, der tatsächlich für eine lose Sammlung von sieben alten Wacholderbäumen aus der Hunza-Region steht. Die Standorte sind zueinander in bezug auf Hangneigung, Exposition und Höhe über NN sehr unterschiedlich (vgl. Tab. 1), was hier in den Werten der letzten vier Spalten

<sup>16</sup> Ein derartiges Plateau ist sehr gut in den Rohwerten des Standorts GEF (Kirgistan) zwischen ca. AD 1820 und 1850 in Anhang I zu erkennen. Eine andere Situation, in der mehrere Plateaus (drei Bäume) ungefähr zeitgleich eingegeben wurden, zeigt Standort Mor 3 in der ersten Hälfte des 15. Jh.s (Anhang I, oben). Wie aus der weiteren Analyse hervorgeht, entspricht dieser Zeitraum einer Phase geringen Wachstums fast aller Bäume (Anhang I, unten).

Land	Tal	Standort	Anz. Kerne	Anz. Bäume	Anz. Bäume li*	Max. Alter	Mittl. Alter	Mittl. Wachstum	Standard-abw.
Kirgistan	Karagai	Hoch	50	30	30	AD 1316	346	0,39 mm	17,2
		Mur	49	25	25	AD 1157	422	0,42 mm	21,8
		Bon	34	20	20	AD 1346	326	0,52 mm	23,0
		Gef	33	19	18	AD 1591	221	0,53 mm	27,4
		Art	51	29	27	AD 1839	093	1,08 mm	49,6
		Kan	28	15	13	AD 1781	082	1,28 mm	53,1
		Gray	65	43	43	AD 1378	227	0,62 mm	37,9
Pakistan	Bagrot	Baq1	34	26	26	AD 1535	189	1,36 mm	71,8
		Baq2	32	19	19	AD 1369	268	0,78 mm	42,0
		Baq3	11	07	05	AD 1679	224	1,41 mm	58,0
		Baq4	31	21	21	AD 1438	236	1,00 mm	42,7
		Baq5	25	17	17	AD 1240	218	1,04 mm	48,0
	Chaprot	Chap1	27	17	14	AD 1587	173	0,75 mm	37,3
		Chap2	32	19	19	AD 1032	481	0,47 mm	23,4
		Chap3	18	11	11	AD 1144	459	0,33 mm	14,5
	Morkhun	Mor1	13	13	13	AD 476	517	0,50 mm	15,3
		Mor2	17	15	15	AD 968	510	0,31 mm	12,3
		Mor3	20	20	20	AD 554	632	0,33 mm	10,4
		Mor4	18	18	18	AD 1069	398	0,35 mm	15,4
	Satpara	Sat1	14	13	13	AD 1412	343	0,64 mm	30,9
		Sat2	30	18	18	AD 736	755	0,28 mm	13,5
		Sat3	29	17	17	AD 388	581	0,29 mm	12,8
	Hunza	Hun	08	07	07	AD 568	774	0,36 mm	20,4

Tab. 2: Probenzahl, Alter, Wachstum und Streuung an den Standorten (\* = Reduktion der Belegungsdichte gegenüber "Anz. Bäume", wenn Individuen vom kollektiven Signal massiv abweichen)

(Alter, Wachstum, Streuung) zum Ausdruck kommt. Diese Differenzierung war ja die Idee der eingangs beschriebenen Beprobungsstrategie. Sie ist nichts anderes als ein Ausdruck der ökologischen Unterschiede oder, aus dem dendrochronologischen Blickwinkel, der wachstumslimitierenden Faktoren an den einzelnen Standorten.

In den Spalten vier und fünf ist die Anzahl der Bohrkerne bzw. der Bäume je Standort angegeben. Auf den ersten Blick wird ersichtlich, daß in Pakistan im Schnitt deutlich weniger Bäume pro Standort beprobt wurden. Aufgrund der Erfahrung bei der Auswertung der pakistanischen Kerne und vor allem der Probleme, die sich mit geringwüchsigem Material ergeben, sind bei der späteren Feldkampagne in Kirgistan weniger, dafür aber stärker replizierte<sup>17</sup> Standorte angelegt worden. Die ältesten Proben, die von Andreas Bosshard im Sommer 1991 gezogen wurden (letzter kompletter Jahring = AD 1990), stammen aus dem Morkhun Tal (ESPER 1994). Der Vergleich der Spalten vier (Anzahl Kerne) und fünf (Anzahl Bäume) zeigt, daß bei dieser Kampagne fast ausschließlich ein Bohrkern je Baum gezogen wurde. Auf den

<sup>17</sup> Replikation ist als Belegungsdichte eingedeutscht worden (KAENNEL et al. 1995).

späteren Felderhebungen erfolgten, wenn es vor Ort möglich war, jeweils zwei hangparallele Bohrungen. Die Reduktion von Anzahl Bäume (Spalte fünf) zu Anzahl Bäume II (Spalte sechs) spiegelt die Selektion einzelner Individuen wider, wenn Kurvenverläufe deutlich von den kollektiven Signalen innerhalb eines Standorts abweichen (vgl. Kap. 2.2). Insgesamt wird der Datensatz dadurch aber lediglich von 439 auf 429 Bäume um 2,3% reduziert. Von den verbleibenden Reihen ist die Belegungsdichte nur in Bag3 und HUN kleiner als 10. Diese Daten werden bei der Auswertung und Interpretation gesondert behandelt.

Spalte sieben (maximales Alter) gibt die Datierung des innersten Jahrrings der jeweils längsten Probe eines Standorts wieder. Nur in wenigen Fällen entspricht diese Angabe dem Markalter (innerster Jahrring einer Scheibe) in Brusthöhe, da aufgrund der Wuchsform (Fig. 5) das Treffen des Zentrums mit einem Zuwachsbohrer schwierig ist. In manchen Fällen kann je nach Wachstumsgeschwindigkeit die Differenz zum Markalter weit über 100 Jahre betragen. Beispielsweise fehlen beim ältesten Baum überhaupt im Standort Sat3 (AD 388) mindestens 200 Jahrringe, da das Mark nicht getroffen wurde und zusätzlich wegen einer Fäulnis die innersten Zuwächse abgetrennt sind. Diese 200 ältesten Jahrringe sind eine schwimmende Serie, die vor AD 388 zeitlich nicht mehr fixiert werden kann, da Crossdating mit anderen Bäumen in diesem Zeitfenster nicht mehr möglich ist. Der betreffende Baum ist wahrscheinlich älter als 2000 Jahre.

Figur 6 aggregiert alle Bäume im kirgisischen Karagui Tal und pakistanischen NW-Karakorum. Die Darstellung der Baumanzahl (Abzisse) gegen die Altersklassen (Ordinate) zeigt auf einen Blick die Altersstruktur der Probanden in den Untersuchungsregionen. Die meisten Bäume sind zwischen 100 und 300 Jahre alt. Nach oben dünnen beide Datensätze aus, wobei die Wacholder (*Juniperus turkestanica* Kom.) im NW-Karakorum deutlich älter werden als im kirgisischen Karagui Tal. Die Replikation der Klassen oberhalb von 1000 Jahren im pakistanischen Datensatz ist die Grundlage für Rekonstruktionen bis in das von PAGES (1995:5) hinterfragte Mittelalterliche Optimum (MO). Die Zahl der Bäume unter 100 Jahren ist in Kirgistan größer, da tief gelegene Standorte geringen Alters stärker repräsentiert sind und bei der Feldkampagne 1996 (mit Prof. Dr. F.H. Schweingruber) eher das Prinzip der Totalerhebung verfolgt wurde.

Bäume werden dann besonders alt, wenn die wachstumslimitierenden Faktoren besonders stark sind. Dies ist an den beprobten Standorten jeweils nahe der oberen, durch die Temperatur determinierten Waldgrenze der Fall (vgl. Tab. 1). Besonders alte Bestände im NW-Karakorum, auch wenn man

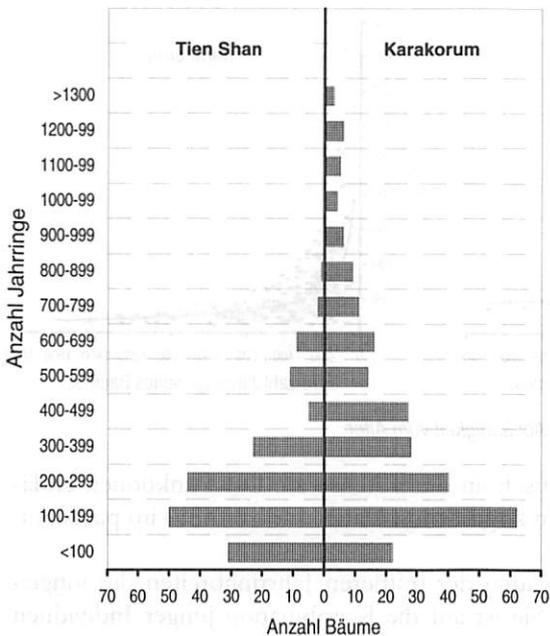


Fig. 6: Altersverteilung der Bäume in Kirgistan und Pakistan

das durchschnittliche Alter berücksichtigt (Spalte 8), sind Chap2 & 3, Mor1 bis 4, Sat2 & 3. Dies sind ausschließlich mittlere oder hoch gelegene Standorte, an denen die durchschnittliche Wachstumsgeschwindigkeit (Spalte 9) sehr gering ist. In den tieferen Lagen (Chap1, Sat1) dieser Täler wachsen die Bäume vergleichsweise schnell und erreichen typisch mitteleuropäische Alter. Innerhalb des NW-Karakorums gedeihen die Bäume im feuchtesten Tal (Bagrot) schneller und erzielen Alter, die auch an den Hochlagenstandorten (Bag3 & Bag5) hinter denen der anderen Täler zurückbleiben. Allerdings ist zu beachten, daß die N-exponierten Flächen (Bag1 bis 3) Mischbestände mit *Picea smithiana* (Wallich) Boiss. und *Pinus wallichiana* A.B. Jackson sind, deren Zuwächse sich generell von denen der Wacholder abheben. Vergleichsweise gering sind die Alter in den kirgisischen Beständen. Doch ist auch hier ein deutliches Gefälle von den höchstgelegenen kalten Plots (HOCH, MUR, BON) zu den tiefen warmen (ART & KAN) zu erkennen. Die Erkenntnisse aus dem NW-Karakorum bezüglich der Wachstumsgeschwindigkeit (Funktion der wachstumslimitierenden Faktoren) sind übertragbar.

Figur 7 setzt die Baumalter (Abszissen) im kirgisischen und pakistanischen Datensatz in Beziehung zu den Wachstumsgeschwindigkeiten (Ordinaten) der jeweiligen Individuen. An den Punktwolken ist deutlich zu erkennen, daß von den 176 Bäumen im Tien Shan und den 253 im Karakorum (Zahlen entsprechen Spalte sechs in Tab. 2) eine systematische Information ausgeht. Junge Bäume (vgl. tief gelegene Standorte in Tab. 1 und Tab. 2) wachsen schneller als alte. Potentielle Anpassungen (Fig. 7 Kurven: Tien Shan  $y_T = 1216,8x^{-0,5813}$ ; Karakorum  $y_K = 1752,8x^{-0,6255}$ ) beschreiben diesen Zusammenhang recht gut. Sie zeigen (von links) ein abnehmendes Gefälle und nähern sich mit

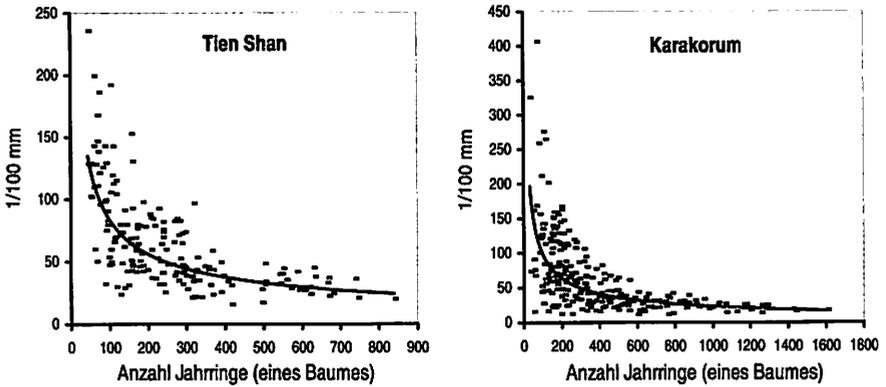


Fig. 7: Wachstumsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Alter

zunehmendem Alter asymptotisch an die x-Achse an. Die Funktionen erklären 53% der Gesamtvarianz im kirgisischen Datensatz und 48% im pakistanischen.

Auffällig ist die große Streuung der mittleren Jahrringbreiten der jungen Bäume (Fig. 7, jeweils links). Sie ist auf die Kombination junger Individuen mit geringer Wachstumslimitierung an den Tieflagenstandorten mit jungen Exemplaren zurückzuführen, deren Bedingungen von Geburt an karg bzw. wachstumshemmend waren. Mit zunehmendem Alter nimmt die Streuung ab, die alten Bäume wachsen bei ausgeglichenen Geschwindigkeiten von meist  $< 0,5 \text{ mm/a}$ .

Auch wenn Figur 7 keine Darstellung des Alterstrends (SCHÄR et al. 1987) ist - dieser wurde je Baum durch die Berechnung von mittleren Jahrringbreiten (Ordinaten) nivelliert - kann der Zusammenhang zumindest in Teilen auch auf dieses Phänomen zurückgeführt werden. Jedoch sind zahlreiche Rohwertzuwachskurven bei Wacholdern (v.a. alte Bäume) relativ unbeeinflusst von einer modellierbaren Abnahme der Jahrringbreite beim Übergang aus der juvenilen in die adulte Phase (BRÄKER 1981), d.h. ein Alterstrend ist hier häufig nicht zu erkennen (vgl. Anhang I, Rohwerte).

In Tabelle 2 gibt die Standardabweichung in der letzten Spalte einen ersten Eindruck von der Homogenität der Rohwerte in  $1/100 \text{ mm}$ . Hohe Standardabweichungen zwischen den einzelnen Serien eines Standorts sind Ausdruck variierender Wachstumsgeschwindigkeiten und somit des Alters bzw. der limitierenden Faktoren. Sie sagen noch nichts über die wahre Homogenität einer indextierten Chronologie aus, da verschieden alte Bäume in einem Plot i.d.R. in Richtung der Ordinate ( $1/100 \text{ mm}$ ) weit auseinander liegen. So

ist es nicht verwunderlich, daß die geringsten Werte an Standorten mit hohem und ähnlichem Alter (vgl. auch Anhang I) vorkommen. Auf der anderen Seite liegen die Serien der hohen Standorte tatsächlich auch ohne Indexierung bereits eng zusammen.

Alter und Wachstumsgeschwindigkeiten sind Ausdruck klimatischer Limitierung. Sie sind zwischen den Standorten sehr variabel und bestätigen im nachhinein die Beprobungsstrategie in Transekten und Tälern unterschiedlicher Feuchte. Wenn die Hypothese zutrifft, daß von den am stärksten limitierten Bäumen die strengsten klimatischen Signale ausgehen (COOK et al. 1992, FRITTS 1976, SCHWEINGRUBER 1996), sind von den Hochlagenstandorten die besten Rekonstruktionen zu erwarten, da hier die Steuerung des Wachstums auf wenige oder einen klimatischen Faktor eingegrenzt werden kann.

### 3.2 Meteorologische Daten

Die grundlegende Problematik bei der Kalibration von Jahrringmerkmalen allgemein und in Zentralasien im besonderen ist die Repräsentativität meteorologischer Meßreihen (TESSIER 1989). Die eingangs beschriebenen klimatisch-ökologischen Gradienten in den Untersuchungsräumen reduzieren die Aussagekraft gemessener Klimaelemente in bezug auf Waldstandorte drastisch. Spannende langjährige oder gar säkulare Meßreihen der Temperatur und des Niederschlags kommen – wenn überhaupt vorhanden – in den Gebirgen meist von den ariden Talsohlen. Dadurch sind insbesondere die absoluten Niederschlagsmengen nur bedingt für Vergleiche mit Jahrringen brauchbar. Beispiele sind die Stationen Skardu oder Gilgit im NW-Karakorum (vgl. Fig. 2) oder mit Abstrichen Tashkent im Ferganabecken. Von den beprobten Waldstandorten liegen die tiefen Plots der Transekte (z.B. Chap1, Sat1, Bag4) diesen Stationen vertikal am nächsten. Mit der Zunahme der Niederschläge bis zur oberen Waldgrenze werden die auf den Talsohlen gemessenen Werte generell unsicherer. Hinzu treten die meist sehr begrenzten Zeiträume, in denen Stationen die Klimaelemente erfaßt haben. Im Vergleich zu mitteleuropäischen Verhältnissen sind die Reihen relativ kurz. Problematisch in allen Stationsreihen der Welt sind die abnehmende Qualität in den älteren Jahrgängen und Inhomogenitäten aufgrund von Stationsverlagerungen (BÖHNER 1996).

Ausgehend von zahlreichen meteorologischen Datensätzen, die J. Böhner aus dem zentralasiatischen Raum zur Verfügung stellte, fließen schließlich sieben Meßreihen der Temperatur und des Niederschlags in die vorliegende

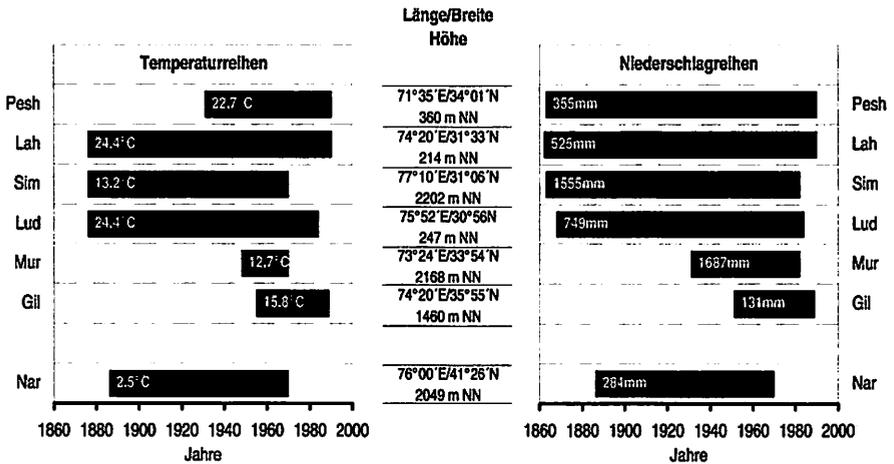


Fig. 8: Länge der meteorologischen Reihen

Studie ein.<sup>18</sup> Diese Daten werden für einen Vergleich mit dendrochronologischen Serien präpariert, um sie als Erklärungsmatrix für Jahrringvariationen einzusetzen. Für diese Kalibration werden die monatlichen Temperaturmittelwerte und Niederschlagssummen der pakistanischen Stationen Peshawar, Lahore, Murree und Gilgit, der indischen Simla und Ludhiana sowie der kirgisischen Naryn verwendet. Bis auf Naryn sind alle Meßreihen südlich der Karakorumhauptkette lokalisiert. Diese werden zu einer regionalen Reihe zusammengefaßt und sollen das Wachstum an den Baumstandorten der Northern Areas (Pakistan) erklären. Für die Standorte im Karagai Tal (Kirgistan) wird ausschließlich die Station Naryn herangezogen, um Jahrringvariationen zu eichen.

Naryn ist eine relativ hoch gelegene Station aus dem zentralen Tien Shan, die aus dem Pool verfügbarer säkularer Reihen (z.B. Tashkent oder Alma Ata) die größte Repräsentativität für das Karagai Tal besitzt. Sie ist eine kontinentale Reihe mit unimodalem Niederschlagjahresgang (Maximum Mai). Die langjährigen Jahresmitteltemperaturen betragen 2,5°C, die Jahresniederschlagssummen 284 mm, gemessen von AD 1886 bis 1970 (Nar in Fig. 8).

Die Reihenlängen, klimatischen Mittelwerte und Angaben zur Lokalität der indischen und pakistanischen Stationen faßt ebenfalls Figur 8 zusammen. Schon aus der Heterogenität der Temperaturen (z.B. Lahore = 24,4°C; Mur-

<sup>18</sup> BÖHNER (1996) wertet in einem neoklimatischen Ansatz Luftdruck-, Temperatur- und Niederschlagschwankungen dieser und vieler anderer meteorologischer Reihen aus. Weitere sehr detaillierte Studien über die raum-zeitliche Variabilität verschiedener Klimaelemente bieten REIMERS (1992) und WEIERS (1995).

ree = 12,7°C) und Niederschläge (z.B. Simla = 1555 mm; Gilgit = 131 mm) wird ersichtlich, daß hier sehr unterschiedlich gelegene und unterschiedlich ausgeprägte Stationen bzw. Reihen herangezogen werden. Simla, Murree, Ludhiana und auch Lahore sind monsunale beeinflusste Serien, deren Niederschlagsmaxima in den Spätsommer fallen. Die absolut höchsten Werte in Murree und Simla sind auf Stauniederschläge in advektiv bewegten Luftmassen mit Ursprung über dem Indischen Ozean zurückzuführen. In Peshawar und vor allem Gilgit sind die Regensummen geringer, das Spätsommermaximum ist abgeschwächt oder gar nicht mehr ausgeprägt (Gilgit). So ist Gilgit zwar die zu den Baumstandorten am nächsten gelegene Meßreihe, jedoch sind insbesondere die Niederschlagsmengen am wenigsten vergleichbar mit denen in den Probeflächen (z.B. obere Waldgrenze im Bagrot Tal mehr als 600 mm, WEIERS 1995). Die Temperaturjahresgänge sind in allen sechs Stationen unimodal verteilt mit Maximum im Hochsommer.<sup>19</sup>

Von den in Figur 8 vorgestellten Stationsreihen sollen die ersten sechs zu einer regionalen Serie zusammengefaßt werden. Dabei sind weniger die absoluten Niederschlagsmengen oder Temperatursummen von Bedeutung. Vielmehr ist eine aussagekräftige Abfolge von interannuellen Variationen anzustreben. Dazu werden von jeder der sechs Stationsreihen die Residuen von den langjährigen Mittelwerten gerechnet (vgl. Kap. 2.1, *as*-Indexierung). Es entstehen normierte Wertereihen, die für jedes Jahr die positiven und negativen Abweichungen in °C bzw. mm von den Mittelwerten anzeigen. Dadurch werden die absoluten Temperaturen und Niederschläge zwischen den Stationen angeglichen, die Größe der Variationen von Jahr zu Jahr wird jedoch nicht tangiert. Insbesondere werden durch diese sehr konservative Standardisierung keine mittelfristigen Schwankungen (z.B. niederfrequente Variationen in Dekadenlänge) eliminiert, die im Rahmen dieser Studie mit mittelfristigen Wachstumsschwankungen verglichen werden sollen.

Tabelle 3 zeigt beispielhaft, wie die Residuen der Jahresmitteltemperaturen  $T_{(a)}$  zusammenpassen. Dargestellt sind die Produktmoment-Korrelationskoeffizienten  $r$  nach Pearson und in Klammern die Anzahl der Jahre, also die Überlappung zwischen den jeweiligen Reihen, die in die Berechnung einfließen. Diese tangieren die Signifikanzniveaus, die als Sterne den Korrelationskoeffizienten beigelegt sind (\*\*\*) = 99,9%, \*\* = 95%, \* = 90%). In den

---

<sup>19</sup> Für die vorliegende Studie sind die meteorologischen Meßreihen eine sekundäre Datenquelle, die an den originären Datensatz der Jahrringbreiten gehalten werden soll. Deshalb ist eine detaillierte Beschreibung der Stationsdaten sicherlich nicht relevant. Für Interessenten wird auf BÖHNER (1996) REIMERS (1992) und WEIERS (1995) verwiesen, die in vorzüglicher Weise die Klimadaten diskutieren.

	Pesh	Lah	Sim	Lud	Murr	Gil	Mean6
Pesh		0,77***	0,57***	0,61***	0,92***	0,39**	0,85
Lah	[60]		0,51***	0,79***	0,84***	0,28*	0,88
Sim	[40]	[95]		0,60***	0,77***	0,46**	0,80
Lud	[54]	[109]	[95]		0,77***	0,40**	0,88
Murr	[23]	[23]	[23]	[23]		0,37	0,92
Gil	[35]	[35]	[16]	[30]	[15]		0,67
Mean6	[60]	[115]	[95]	[109]	[23]	[35]	

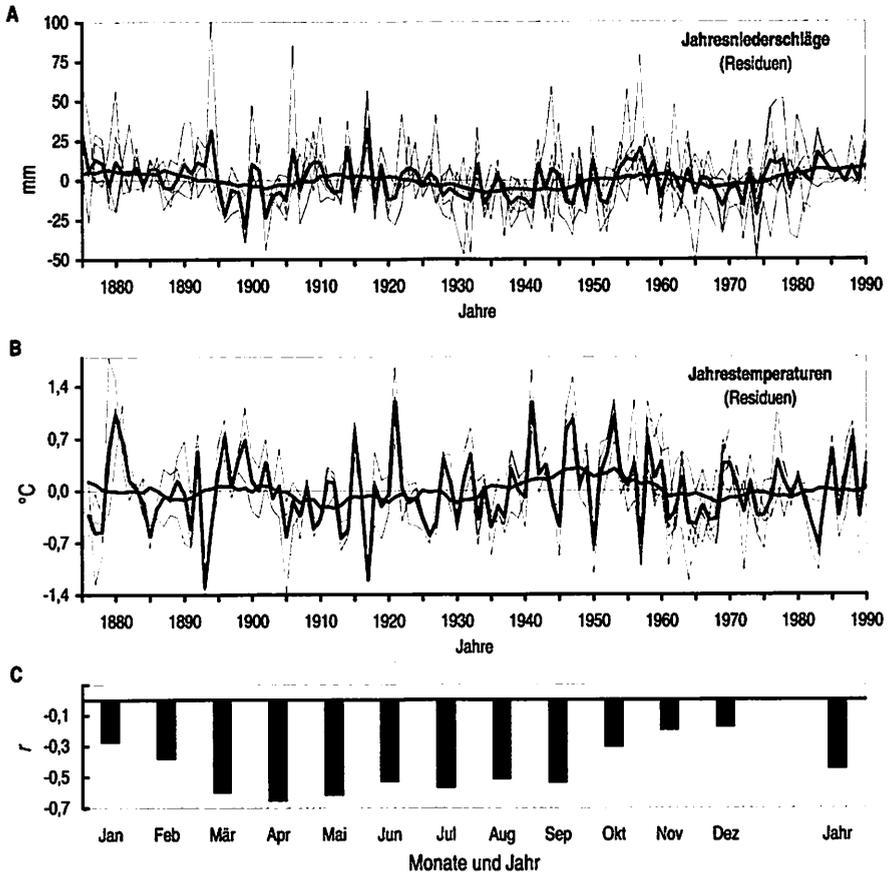
Tab. 3: Korrelationskoeffizienten zw. Temperaturreihen (Residuen), [ ] gemeinsame Überlappung, \*\*\* Signifik.

Spalten (und Zeilen) eins bis sechs sind die Werte der einzelnen Stationen eingetragen. Spalte (und Zeile) sieben zeigt  $r$  und die Überlappung, wenn die jeweiligen Stationen mit der Mittelkurve aus allen Reihen (Residuen) verglichen werden. Die regionale Mittelkurve aus sechs pakistanischen und indischen Stationen wird im folgenden als „Mean6“ bezeichnet. Die Überlappung in Zeile sieben entspricht den jeweiligen Serienlängen der Stationsreihen (vgl. Fig. 8). Signifikanzen können für den Zusammenhang der Einzelstationen zu Mean6 nicht angegeben werden, da einzelne Reihen in verschiedenen Zeitfenstern einen unterschiedlich starken Input in die Mittelkurve haben. Zum Beispiel rekrutieren sich die Werte von AD 1876 bis 1930 allein aus den Stationen Lahore, Simla und Ludhiana, da dies die längsten Meßreihen sind. Bei der Kalibration mit Mean6-Reihen (vgl. Kap. 6.1, 6.2), seien es Jahresmitteltemperaturen  $T_{(a)}$ , Sommertemperaturen  $T_{(Jun-Aug)}$  oder Jahresniederschlagssummen  $NS_{(a)}$ , ist generell zu beachten, daß sich die Mittelwerte (Mean6) in einzelnen Zeitabschnitten auf unterschiedlich viele Stationen berufen und die Aussagekraft in den älteren Jahrgängen generell nachläßt.

Tabelle 3 zeigt deutlich, daß die  $T_{(a)}$  der Stationen sehr gut untereinander korrelieren und insbesondere die Anteile an Mean6 (Spalte sieben) stabil sind. Bis auf die Temperaturreihe von Gilgit erzielen alle Vergleiche zueinander das Signifikanzniveau von 99,9%. Gilgit korreliert nur abgeschwächt zu Lahore, keine signifikanten Werte werden beim Vergleich mit Murree erreicht. Allerdings sind die geringen Überlappungen zu berücksichtigen. Zwischen Gilgit und Murree beträgt sie lediglich 15 Jahre.

Die hier für  $T_{(a)}$  vorgestellten Werte sinken, wenn Mean6 für einzelne Monate berechnet und auf dieser Grundlage die Homogenität der Stationen zueinander quantifiziert wird. Offensichtlich unterliegen die Monatswerte, auch wenn sie für die Kalibration spannend sind (z.B. Temperatur der Vegetationsperiode), einer größeren räumlichen Streuung. Jahresmittelwerte hingegen sind Integrale, in denen Unterschiede zwischen den recht weit voneinander entfernt liegenden Stationen ausgeglichen werden. Sie passen besser zusammen. Ähnliches gilt für die räumlich heterogeneren Niederschläge (Fig. 9).

Spalten (und Zeilen) eins bis sechs sind die Werte der einzelnen Stationen eingetragen. Spalte (und Zeile) sieben zeigt  $r$  und die Überlappung, wenn die jeweiligen Stationen mit der Mittelkurve aus allen Reihen (Residuen) verglichen werden. Die regionale Mittelkurve aus sechs



**Fig. 9:** Mean6 - Regionale Temperatur- und Niederschlagsreihe aus verschiedenen Klimastationen.  
**A & B:** NS<sub>(a)</sub> und T<sub>(a)</sub> von sechs Stationen (dünne Linien), Mittelkurven und Filter (dicke Linien)  
**C:** Korrelationskoeffizienten der Monate (und Jahr) zwischen Temperatur und Niederschlag (Mean6)

Auch wenn die Mittelkurven Mean6 für die Klimaelemente Temperatur und Niederschlag sowie für einzelne Zeitfenster (Jahr, Monate oder Vegetationsperiode) unterschiedlich stabil sind und jeweils andere Stationen besser zusammenpassen, ist die Berechnung von regionalen Serien die einzige Möglichkeit, aussagekräftige integrierte Wertereihen für die Kalibration von Zuwachskurven zu erhalten. Tests an mehr als 15 einzelnen Stationen ergaben, daß die Repräsentativität singulärer Reihen weitaus geringer ist als die regionaler Mittelkurven. Festzuhalten bleibt, daß die Mean6 der Jahresmitteltemperatur T<sub>(a)</sub> die beste Generierung des regionalen Klimas darstellt. Im Mittel

korrelieren die sechs Stationen mit  $r = 0,84$  zu Mean6  $T_{(a)}$ . Der entsprechende Wert für Mean6  $NS_{(a)}$  ist  $r = 0,54$ .

In Figur 9 A & B sind die Residuen der Jahresniederschläge  $NS_{(a)}$  der einzelnen Stationen (A: dünne gezackte Linien) und die Residuen der Jahrestemperaturen  $T_{(a)}$  der einzelnen Stationen (B: dünne gezackte Linien) dargestellt.<sup>20</sup> Sehr deutlich ist die Homogenität von  $T_{(a)}$  zu erkennen (B), die sich zumindest in einzelnen Zeitabschnitten von  $NS_{(a)}$  abhebt (A). Allerdings spiegelt in beiden Abbildungen die Mittelkurve Mean6 (dicke gezackte Linie) die interannuellen Variationen wider. Sie generalisiert zu regionalen Signalen und reagiert sensibel auf homogene Ausreißer in den Stationswerten. Die konservative Indexierung (*ar*: Residuen von langjährigen Mittelwerten) hat potentielle niederfrequente Variationen in den einzelnen Stationsreihen belassen, was in den gefilterten Kurven (dicke glatte Linien: 15-jährige ungewichtete gleitende Mittelwerte) zum Ausdruck kommt.<sup>21</sup> Alle Stationsreihen besitzen ein Low-Frequency Signal, das untereinander recht gut parallelisierbar ist. Ausgehend von einer extrem hohen Autokorrelation 1. Ordnung von  $> 0,9$  ( $T_{(a)}$  und  $NS_{(a)}$ ) sind die Werte bei einem Kurvenversatz von zehn Jahren ( $Lag = 10$ ) in den gefilterten Mean6-Serien (dicke glatte Kurven) noch immer  $> 0$  ( $T_{(a)} = 0,29$ ,  $NS_{(a)} = 0,13$ ).

Korreliert man die  $T_{(a)}$  und  $NS_{(a)}$  in der Zeitscheibe AD 1900 bis 1975 zueinander, wird deutlich, daß die beiden Variablen alles andere als unabhängig sind (Fig. 9 C). Die Jahresniederschläge von Mean6 korrelieren signifikant negativ ( $r = -0,45$ ) mit den Jahrestemperaturen (Fig. 9 C: letzter Balken rechts). Auf Monatsbasis wird eine deutliche Saisonalität dieses Zusammenhangs offensichtlich. In den Wintermonaten sind die Variablen unabhängiger als in den Frühjahrs- und Sommermonaten. Der reduzierende Einfluß der Bewölkung auf die Temperaturen ist in der strahlungsintensiven Jahreszeit deutlich größer. Dann ist mit einem Niederschlagereignis ein signifikanter Temperaturabfall verbunden.

<sup>20</sup> Auf unterschiedliche Liniensignaturen mußte wegen der Informationsfülle in der Figur verzichtet werden. Interessant ist nicht, in welchem Jahr welche Station abweicht, sondern wie der Gesamteindruck ist. Was ist Mean6 und wie sehen die regionalen Mittelkurven aus?

<sup>21</sup> Aufgrund der Filterverkürzung an den Serienenden sind die Kurven an den Extremen unruhiger. Dies gilt für die Werte vor AD 1990 bei  $T_{(a)}$  und  $NS_{(a)}$  sowie nach AD 1876 bei  $T_{(a)}$ . Mean6 der Niederschläge geht in Wahrheit zurück bis AD 1862, weshalb hier der dargestellte Filter nach 1875 nicht unruhiger wird (Fig. 9).

## 4 MITTEL- UND LANGFRISTIGE WACHSTUMSVARIATIONEN

An verschiedenen Stellen wurde bereits von Jahrringvariationen gesprochen, es wurde in Aussicht gestellt, diese zu vergleichen oder an meteorologischen Meßreihen zu kalibrieren. Welche Signale aber sind es, die im Stammzuwachs der Bäume archiviert sind, die also einer klimatischen Argumentation zugeführt werden können, und wie homogen bzw. heterogen sind sie? Neben dem interannuellen Anteil, den Variationen von Jahr zu Jahr, die bei der Extremjahanalyse im Vordergrund stehen (vgl. Kap. 5), existieren auch niederfrequente Schwankungen über Dekaden und Jahrhunderte, deren Zusammensetzung im folgenden diskutiert wird.

Grundsätzlich werden hier zwei „Signaltypen“ unterschieden, (i) mittelfristige Wachstumsvariationen oder das Low-Frequency Signal und (ii) langfristige Wachstumsvariationen oder das Very-Low-Frequency Signal. Mit Hilfe der Indexierung an 101-jährigen modellierten gleitenden Mittelwerten (vgl. Kap. 2.1: *8d*-Indexierung) werden Jahrringbreitenschwankungen in Dekadenlänge bis hin zu mehreren Dekaden betont. Zu beachten ist, daß alle Variationen oberhalb von 100 Jahren durch die gewählten Filter eliminiert sind. Die resultierenden Indexserien werden in Kapitel 4.1 vorgestellt und auf Homogenität untersucht. Kapitel 4.2 und 4.3 stellen Vergleiche an diesen Kurven bzw. an Standortchronologien aus den Einzelserien an. Sie analysieren Zusammenhänge und Unterschiede zwischen einzelnen Standorten (z.B. in den Transekten), zwischen verschiedenen Tälern im NW-Karakorum und zwischen den Hochlagenstandorten Pakistans und Kirgistans.

Das Very-Low-Frequency Signal (Kap. 4.4) wird ausschließlich aus 1000-jährigen pakistanischen Wachholdern generiert. Säkulare Trends resultieren aus der einfachsten aller Indexierungsmethoden, der Division durch die Gesamtmittelwerte (vgl. Kap. 2.1: *ad*-Indexierung). Schließlich wird auch von diesen Signalen die Homogenität in den einzelnen Jahrhunderten quantifiziert. An dieser Stelle kommen darüber hinaus die bei der *8d*-Indexierung angelegten 101-jährigen Filter zur Diskussion. Die Frage ist, ob mit diesem Verfahren säkulare Trends eliminiert werden, die zwischen den Einzelserien oder Standorten parallelisierbar, also systematisch, sind.

### 4.1 Standortinterne Homogenität

Mittelfristige Wachstumsvariationen oder das Low-Frequency Signal sind mit Ausnahme der kirgisischen Standorte ART und KAN von allen Untersuchungsflächen in Anhang I (jeweils unten) dokumentiert. Dargestellt sind die *8d*-indexierten Einzelserien (dünne Linien), die Mittelkurven daraus (dicke Linie = 15-jährige ungewichtete Filter) und die Belegungsdichten (graue Flächen),

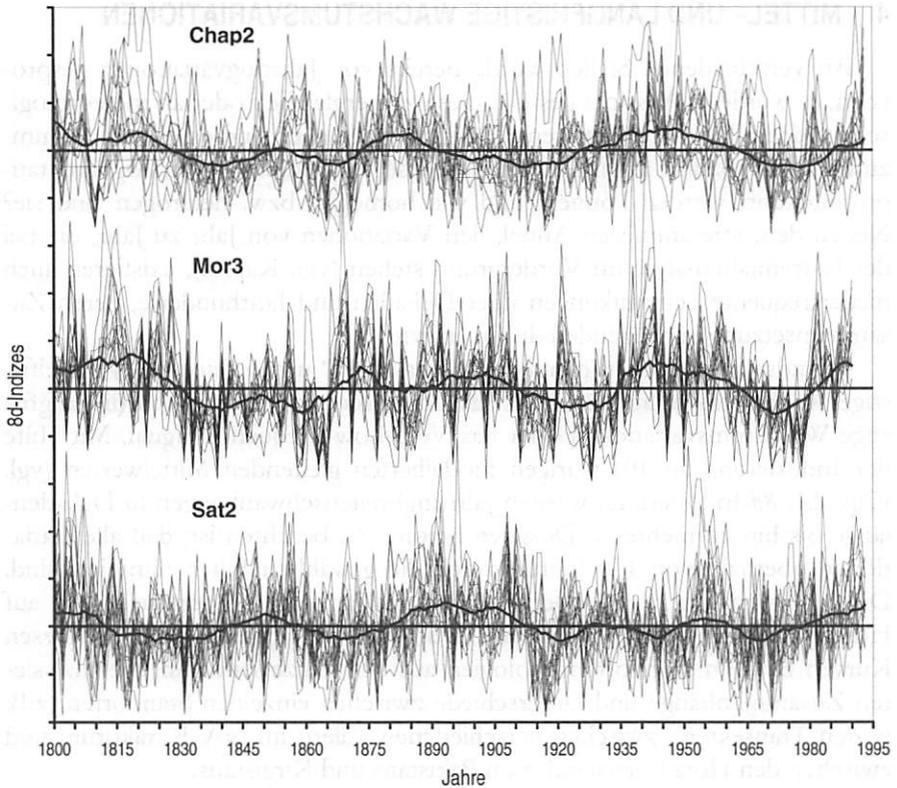


Fig. 10: Zuwachskurven an den Standorten Chap2, Mor3 und Sat2 (Pakistan)

also die Anzahl der Bäume, die zur Mittelkurve beigetragen haben. Diese Mittelkurven bzw. die geglätteten Kurven daraus werden als *8d*-Standortchronologien bezeichnet. Die Länge der Chronologien ist abhängig vom Alter der Bäume an einem Standort. Sie enden generell bei einer Belegungsdichte von  $n = 3$ .

Figur 10 illustriert den Ausschnitt AD 1800 bis 1993 von Chap2, Mor3 und Sat2 aus Anhang I. Die Darstellung zeigt lediglich die jüngsten Abschnitte dieser pakistanischen Hochlagenstandorte, die ausschließlich über 3500m NN liegen. Die Liniensignaturen entsprechen denen aus Anhang I, wobei die einzelnen Untersuchungsflächen durch einen Offset von 250 Indexwerten vertikal zueinander versetzt wurden. Deutlich tritt die interannuelle Homogenität der Jahrringbreiten in Chap2 und Sat2 hervor, die in Mor3 noch einmal übertroffen wird. Hier sind in zahlreichen Jahren dunkle „Zacken“ zu erkennen, die anzeigen, daß sehr viele Bäume (teilweise alle) von einem Jahr zum nächsten einen breiten und dann einen schmalen Ring ausge-

bildet haben. Die interannuellen Variationen sind demnach homogen und weisen auf eine übergeordnete klimatische Steuerung des Wachstums hin (vgl. Kap. 5: Extremjahanalyse).

Neben dieser Frequenz werden aber auch längerfristige Variationen der Jahrringbreite evident, die in den gefilterten Chronologien (dicke Linien) zum Ausdruck kommen. So starten alle drei Standorte von einem erhöhten Niveau nach AD 1800, um zwischen AD 1830 und 1840 einen ersten Tiefpunkt zu erreichen. Diese mittelfristige Wachstumsvariation wird, ebenso wie die anschließenden bis AD 1993, von fast allen Einzelbäumen nachgezeichnet. Wie Anhang I zu entnehmen ist, handelt es sich hierbei um das eigentlich originäre Signal, das an allen untersuchten Standorten mit Hilfe der  $\delta d$ -Indexierung betont werden kann. Figur 10 zeigt aber auch, daß die Streuung der Einzelseerien, die zu einer Chronologie beitragen, (i) zwischen den Standorten unterschiedlich ist und (ii) innerhalb eines Standorts mit der Zeit variiert. Die erste Beobachtung wird durch den visuellen Vergleich von Chap2 (größere Streuung) und Mor3 (geringere Streuung) verifiziert. In Chap2 sieht man außerdem deutlich, wie sich die Streuung der Einzelseerien verändert. Die positiven Zuwächse um AD 1820, die durch die geglättete Mittelkurve sichtbar werden, rekrutieren sich aus signifikant stärker streuenden Einzelseerien, als die positive Phase um AD 1940, da die Einzelkurven näher beieinander liegen.

Bevor die angesprochenen Homogenitätsunterschiede weiter vertieft werden, sollen die  $\delta d$ -Chronologien von allen Standorten vorgestellt werden. Figur 11 zeigt oben fünf Chronologien aus Kirgistan und unten 16 aus Pakistan (15-jährige Filter).<sup>22</sup> Die entsprechenden Einzelseerien gehen aus Anhang I hervor. Tabelle 4 faßt wesentliche statistische Parameter und die maximalen Belegungsdichten je Standort zusammen. Entscheidend ist, daß die Anzahl der Bäume, die zu einer  $\delta d$ -Chronologie beigetragen haben (Tab. 4: Anz. Bäume III), gegenüber den Rohwertkurven (Tab. 4: Anz. Bäume II) gesunken ist.<sup>23</sup> Ausgehend von den Kurvenkollektiven in der ursprünglichen Dimension

---

<sup>22</sup> Da die Bäume an den kirgisischen Standorten ART und KAN zu jung sind (Tab. 2), können keine 101-jährigen modellierten gleitenden Mittelwerte, wie sie die  $\delta d$ -Indexierung vorsieht, angelegt werden. Deshalb fehlen entsprechende Indexreihen von diesen Standorten in Anhang I und Figur 11.

<sup>23</sup> Die Angaben "Anz. Bäume II" in Tabelle 4 entsprechen denen aus Tabelle 2. Ausgehend von dieser Größe sind zunächst alle Bäume mit weniger als 150 Jahringen entfernt worden, wodurch die Gesamtzahlen auf  $n = 104$  (Kirgistan) bzw.  $n = 206$  (Pakistan) sinken. In Kirgistan fehlen bereits die Standorte ART und KAN. Die verbleibenden Bäume werden einer visuellen Kontrolle unterzogen, um zu prüfen, ob Individuen phasenweise oder insgesamt von den kollektiven Trends abweichen. Auf diese Weise werden weitere 32 (Kirgistan) bzw. 15 Bäume (Pakistan) gestrichen. Die zweite Reduktion verursacht keine nennenswerten Unterschiede in den Mittelkurven.

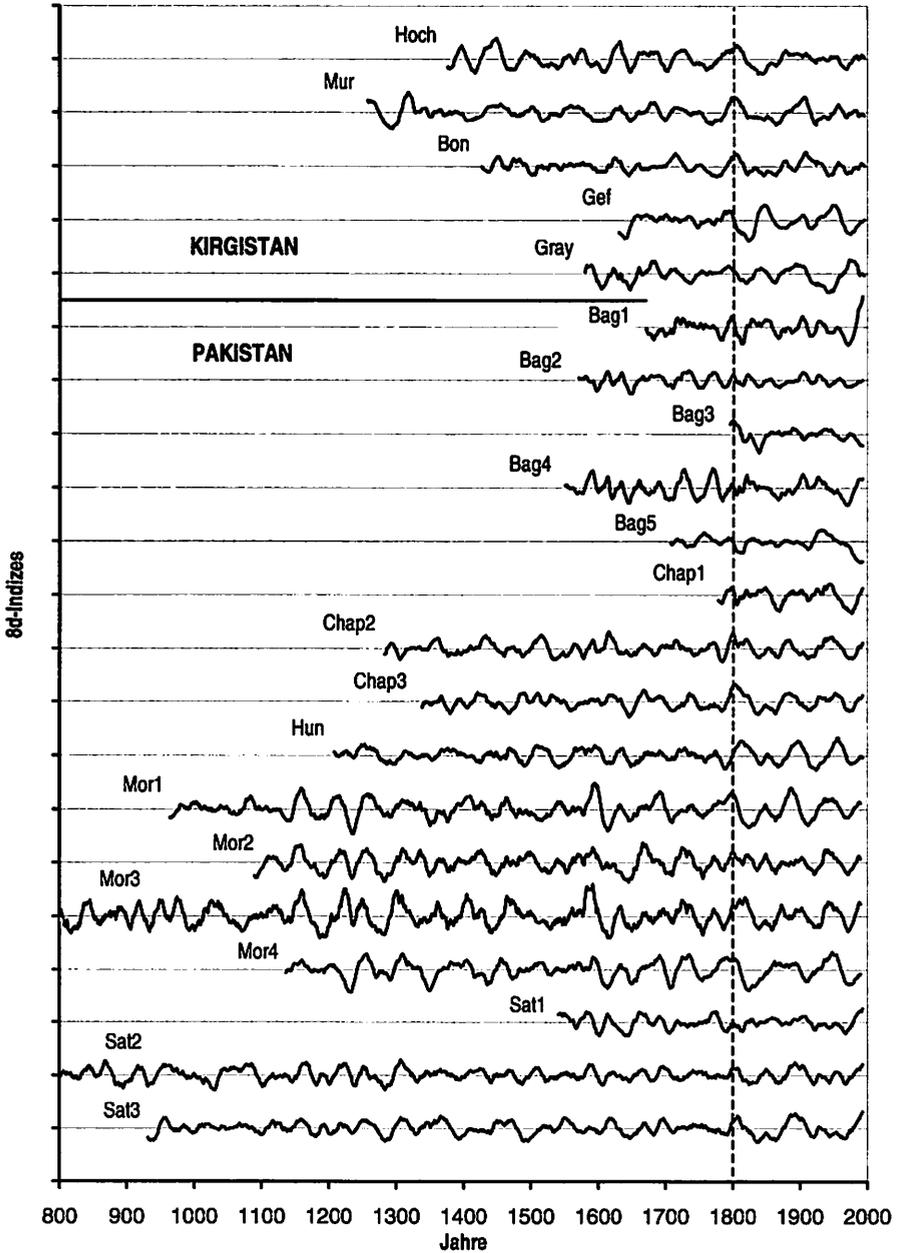


Fig. 11: 8d-indizierte Chronologien (15-jährige Filter, ungewichtet) von 5 kirgisischen und 16 pakistanischen Standorten

1/100 mm, wie sie in Anhang I jeweils oben dargestellt sind, ist in verschiedenen Selektionsschritten die Belegungsdichte in den Standorten reduziert worden.

Zur Orientierung ist in Figur 11 eine gestrichelte Linie im Jahr 1800 eingezeichnet. Der Zeitraum danach entspricht dem Bildausschnitt von Figur 10. In allen gefilterten Chronologien ist ein Low-Frequency Signal archiviert. Schon auf den ersten Blick erscheinen zahlreiche Wellenberge und -täler synchron. So sind beispielsweise an fast allen Standorten um AD 1800 breitere Jahrringe gewachsen. Meist gegen AD 1830 fallen die Breitenindizes dann in eine Depression. An den einzelnen Serien können Phasen mit großer Amplitude von ausgeglicheneren Perioden unterschieden werden. So sind z.B. in den Chronologien von Chap2 und HUN zwischen ca. AD 1630 und 1780 kaum Variationen zu erkennen. Nach AD 1780 jedoch nehmen die Amplituden wieder zu und ein deutliches Low-Frequency Signal wird sichtbar.

Die  $\delta d$ -Chronologien dokumentieren Wachstumsschwankungen in Dekadenlänge, die an manchen Standorten bis weit in das letzte Jahrtausend hinein reichen. Es wird zu prüfen sein, wie stabil diese Variationen, und welche Umwelt- bzw. Klimazustände in diesem Low-Frequency Signal archiviert sind.

Betrachtet man die Gleichläufigkeiten (GLK), Standardabweichungen (STABW) und Variationskoeffizienten (VAR) in Tabelle 4, entsteht ein Eindruck, mit welcher Homogenität die einzelnen Chronologien zusammengesetzt sind, wie gut also die Mittelkurven die Einzelerien repräsentieren. Die GLK ist für Rohwertserien berechnet, wobei zu bedenken ist, daß dieser Parameter durch die Indexierung nicht tangiert wird. Ausgangspunkt sind jeweils alle Bäume eines Standorts. Diese werden jeder zu jedem verglichen und durch einen Vorzeichentest (auf- und absteigende Intervalle von Jahr zu Jahr) in Beziehung gebracht. Es entsteht eine Matrix, die für jeden Baum anzeigt, wieviel Prozent seiner Intervalle mit den anderen Bäumen übereinstimmen. Die mittlere Maßzahl aus diesen GLK's könnte man als „Interseries-GLK“ bezeichnen (Tab. 4, Spalte fünf). An fast allen Standorten wird der Wert von 60% erreicht oder überschritten. Allein die Standorte MUR, BON, GRAY, Bag4 und Sat1 liegen bei 58% bzw. 59%. Spitzenwerte erzielen die Bäume in den Standorten Bag4 (69%) und Mor3 (73%), wobei die geringe Belegung in Bag4 zu berücksichtigen ist. Hohe Interseries-GLK zeigt eine große Homogenität der Variationen von Jahr zu Jahr an und kann als Maß ausgelegt werden, wie stark die Bäume eines Standorts durch den gleichen limitierenden Faktor beeinflusst werden. Diese Aufschlüsselung widerspricht der Annahme, daß die GLK zu den Waldgrenzstandorten (Tab. 1) generell zunimmt. Zwar trifft diese Beobachtung im Satpara Tal zu (Sat1 = Tieflagenstandort), wird

Land	Tal	Standort	ROHWERTE			8d-INDIZES			
			Anz. Bäume II	Mittl. GLK [%]	Variationskoeff.	Anz. Bäume III*	Autokorr. Lag 1 (10)	Standardabw.	Variationskoeff.
Kirgistan	Karagui	Hoch	30	61	0,54	21	0,48 (0,03)	29,9	0,31
		Mur	25	59	0,59	16	0,49 (0,07)	29,8	0,31
		Bon	20	59	0,56	14	0,40 (0,02)	27,6	0,28
		Gef	18	58	0,57	11	0,65 (0,08)	29,7	0,32
		Art	27	63	0,48	-	-	-	-
		Kan	13	61	0,46	-	-	-	-
		Gray	43	58	0,70	23	0,58 (0,11)	31,9	0,33
Pakistan	Bagrot	Bag1	26	64	0,74	11	0,62 (0,00)	30,2	0,32
		Bag2	19	62	0,56	17	0,60 (-0,08)	21,8	0,22
		Bag3	05	69	0,46	04	0,43 (-0,10)	12,6	0,13
		Bag4	21	65	0,56	16	0,60 (-0,04)	31,2	0,32
		Bag5	17	59	0,51	11	0,64 (0,17)	21,5	0,23
	Chaprot	Chap1	14	64	0,56	06	0,48 (-0,01)	32,7	0,36
		Chap2	19	64	0,61	15	0,54 (-0,07)	26,6	0,27
		Chap3	11	62	0,45	09	0,44 (-0,04)	28,6	0,29
	Morkhun	Mor1	13	64	0,54	09	0,40 (0,04)	26,7	0,28
		Mor2	15	66	0,43	12	0,40 (0,01)	25,9	0,27
		Mor3	20	73	0,52	15	0,20 (-0,01)	29,1	0,32
		Mor4	18	64	0,53	12	0,53 (0,07)	28,7	0,30
	Satpara	Sat1	13	59	0,55	12	0,53 (-0,08)	26,7	0,27
		Sat2	18	62	0,52	18	0,30 (-0,06)	28,3	0,29
		Sat3	17	66	0,47	17	0,36 (0,02)	22,6	0,23
Hunza	Hun	07	61	0,58	07	0,41 (0,09)	27,3	0,28	

Tab. 4: Statistische Kennziffern der Rohwerte und 8d-Indizes (\* = Reduktion der Belegungsdichte gegenüber Anz. Bäume II, wenn Individuen jünger 150 Jahre sind oder vom Signal abweichen)

jedoch zugleich im Chaprot Tal widerlegt (Chap1 = Tieflagenstandort). Auffällig ist allerdings die durchgehend hohe GLK an den Hochlagenstandorten Mor1-4. Da die GLK mit der mittleren Serienlänge an Aussagekraft gewinnt und die Standorte im Morkhun Tal durchweg alt sind, belegen die Zahlen die interannuelle Homogenität an diesen ausschließlich waldgrenznahen Standorten.

Die Standardabweichung (STABW) ist ein Streuungsmaß, das, wenn es zwischen den einzelnen Bäumen eines Standorts in jedem Jahr berechnet wird, ausdrückt, „wie weit“ die jeweiligen Serien voneinander entfernt liegen. Den Variationskoeffizienten (VAR) erhält man durch Division der jährlichen STABW durch das mittlere Wachstum der Bäume in den entsprechenden Jahren. VAR ist somit frei vom mittleren Wachstumsniveau oder, anders ausgedrückt, er ist unabhängig davon, ob in einzelnen Jahren insgesamt breite oder eher schmale Ringe vorliegen. Diese Eigenschaft berücksichtigt, daß große Zuwächse a priori stärker variieren als schmale. So können mit VAR Standorte verglichen werden, deren Zuwachsleistungen unterschiedlich sind. Beide Parameter, STABW und VAR, werden für jedes Jahr berechnet und

dann gemittelt. Die durchschnittlichen Werte für die Rohwertkurven und  $\delta d$ -Indizes gehen aus Tab. 4 hervor.

Die Rohwerte von Mor2, Bag3 und KAN erzielen die geringsten VAR. Hier streuen die Kurven im Mittel am wenigsten. Insbesondere hebt sich deren Homogenität von den Standorten Bag1, GRAY und Chap2 ab, an denen maximale VAR berechnet werden. Durch die Indexierung, und das ist die wesentliche Information, sind die Variationskoeffizienten zwischen den Standorten stabilisiert worden. Sie liegen durchgehend zwischen 0,22 und 0,36. Allein Bag3 unterschreitet mit 0,13 den Durchschnitt, was auf die geringe Belegung zurückzuführen ist. Unterschiede in dieser Spannweite zu diskutieren, ist sicherlich nicht sinnvoll. Festzuhalten bleibt jedoch, daß VAR die  $\delta d$ -Indexierung bestätigt, sie sozusagen im Nachhinein als richtig einstuft.<sup>24</sup> Die Streuung der Einzelserien ist gesunken, die Vergleichbarkeit der Standorte ist gestiegen und die Standortchronologien rekrutieren sich aus homogenen Einzelkurven.

Auffällig ist, daß STABW und VAR bei den  $\delta d$ -Indizes lediglich um zwei Stellen hinter dem Komma verschoben sind. Da jedoch die indexierten Einzelserien im Mittel um 100 schwanken, ist diese Verschiebung erklärbar. Für die Darstellung von Standortmittelwerten der Streuung kann in diesem Fall sowohl die Standardabweichung als auch der Variationskoeffizient verwendet werden.

Schließlich zeigt die Autokorrelation (Spalte acht) an, mit welcher Persistenz die Signale in den  $\delta d$ -Chronologien enthalten sind. Bei einem Kurvenversatz von einem Jahr werden durchweg positive Autokorrelationen erzielt, die erst bei Lag = 10 gegen bzw. unter Null sinken.

Die diskutierte Homogenität illustriert, mit welcher Intensität das Jahringwachstum der Bäume innerhalb eines Standorts von den gleichen Umweltfaktoren limitiert wird. Die mittleren statistischen Kennziffern geben jedoch nicht an, ob diese Homogenität entlang der Zeit stabil ist. Möglicherweise streuen die Einzelserien im 19 Jh. geringer als im 18 Jh. oder umgekehrt?

Figur 12 zeigt am Beispiel von Standort Sat2 die jährlichen Variationskoeffizienten seit AD 1800. Die Darstellung entspricht im oberen Teil (A) den Kurven aus Figur 10. Lediglich die Mittelkurve (dicke Linie) aus den  $\delta d$ -indexierten Einzelserien ist in diesem Fall nicht geglättet. Unten (B) sind die Variationskoeffizienten (dünne Linie) und der resultierende 11-jährige ungewichtete

---

<sup>24</sup> Berechnungen mit vergleichbaren Indexierungsverfahren, also Verfahren, die ebenfalls in der Lage sind, das Low-Frequency Signal zu betonen (z.B. negative Exponentialfunktionen), zeigen, daß die Streuung der Einzelserien größer wird.

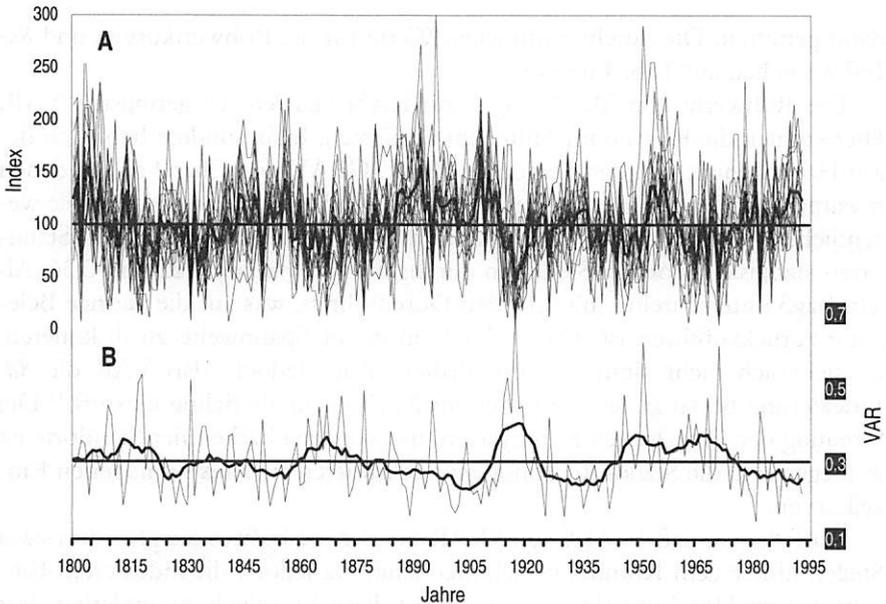


Fig. 12: 8d-indexierte Zuwachskurven an Standort Sat2 (A) und jährliche Variationskoeffizienten (B)

gleitende Mittelwert (dicke Linie) aufgezeichnet. Deutlich ist zu erkennen, daß VAR von Jahr zu Jahr unterschiedliche Werte annimmt, die gefilterte Kurve jedoch sehr ausgeglichen verläuft. Der absolute Spitzenwert wird AD 1917 erzielt, ein äußerst schmaler Jahrring in fast allen Bäumen, was auf die Grenzwertproblematik von VAR gegen Null deutet.<sup>25</sup> Häufig korrelieren positive Ausschläge von VAR mit schmalen Jahrringen, die allerdings visuell als relativ homogen erscheinen. Diese Tatsache hängt mit der Streuung zusammen, die im Mittel eher breiten Jahren zugebilligt wird als schmalen: Sind die absoluten Differenzen zwischen den Einzelserien in breiten Jahren gleich denen in engen Jahren, so streuen die Werte im zweiten Fall stärker.<sup>26</sup> Die ge-

<sup>25</sup> Die Grenzwertproblematik und eine ausführliche Diskussion von VAR, Standardabweichung und GLK wird an dieser Stelle nicht vertieft. Detaillierte Untersuchungen der Streuungsparameter und Vergleiche mit Kennwerten aus der Literatur sind in Bearbeitung. Dort wird auch eine geeignete Maßzahl vorgeschlagen, die sich aus den verschiedenen Homogenitätsparametern zusammensetzt.

<sup>26</sup> An einem einfachen Beispiel, dem Vergleich von zwei idealisierten Jahren, wird dies deutlich. Im ersten Jahr beträgt die mittlere Jahrringbreite, berechnet aus zehn Einzelserien, 1 mm. Die Einzelserien streuen alle mit 0,1 mm um den Mittelwert. Im zweiten Jahr liegt der mittlere Zuwachs bei 0,1 mm, und die Einzelserien streuen um 0,01 mm. Dann erscheint das Jahr eins visuell weitaus heterogener. In Wahrheit sind die Streuungen jedoch gleich. Die Standardabweichung würde die Unterschiedlichkeit ausdrücken und VAR die Gleichheit.

filterte VAR-Kurve zeigt – wenn auch schwache – Überschreitungen und Unterschreitungen an, die auf inhomogene und homogene Phasen schließen lassen. An diesem Beispiel ist jedoch ausschließlich die Überschreitung von ca. AD 1950 bis 1960 visuell nachvollziehbar, da einige Einzelkurven deutlich nach oben streuen. Insgesamt zeigen die gefilterten Variationskoeffizienten eine relativ stabile Homogenität an, die zwischen 0,2 und 0,4 liegt.

Vergleichbar mit Figur 12 sind von allen Standortchronologien VAR-Kurven berechnet worden (ohne Figur). Sie belegen, daß die pakistanischen Chronologien vor allem in den älteren Abschnitten vor AD 1100 äußerst gering streuen, die Signale also um die Jahrtausendwende stabil sind. Ebenfalls um AD 1400 ( $\pm 50$  Jahre) sind die Chronologien aus Pakistan und Kirgistan stabiler, d.h. die Variationskoeffizienten sind systematisch niedriger. Erhöhte Streuungen in fast allen Chronologien aus dem NW-Karakorum werden ca. von AD 1590 bis 1670 angezeigt. Gleichzeitig streuen von den kirgisischen Standorten nur zwei verstärkt. In den Standorten des Karagui Tals ist allerdings eine systematische Zunahme der Heterogenität und somit eine Abnahme der Aussagekraft der Chronologien ab AD 1800 zu verzeichnen. Maximale Werte werden nach AD 1800 (ca. 30 Jahre) und AD 1900 (ca. 20 Jahre) verzeichnet.

Insgesamt ist die zeitabhängige Streuung überraschend stabil. Die dargestellten Chronologien (Fig. 11) besitzen fast durchgehend eine hohe Aussagekraft. Mittelfristige Wachstumsvariationen, ausgedrückt durch  $\delta d$ -Chronologien, resultieren aus parallel verlaufenden Zuwachskurven der Einzelbäume an den Standorten. Parallele Zuwachsschwankungen wiederum sind ein Indiz für einheitliche Wachstumssteuerung. Wenn viele Bäume an einem Standort gleich reagieren, *können* Klimavariationen dafür verantwortlich sein. Wenn jedoch die Low-Frequency Signale zwischen den Standorten parallelisierbar sind, *müssen* Klimatelemente das Wachstum maßgeblich gesteuert bzw. limitiert haben.

## 4.2 Standortvergleiche

Nachdem die Homogenität der Einzelserien und deren Einfluß auf  $\delta d$ -Standortchronologien untersucht bzw. verifiziert wurde, können systematische Vergleiche zwischen den Standorten durchgeführt werden. Es wurde aufgezeigt, daß (i) das Low-Frequency Signal in den Einzelserien durch die  $\delta d$ -Indexierung vom Rauschen in den Rohwertkurven getrennt wird, daß (ii) Standortmittelkurven die kollektiven Trends sauber wiedergeben und daß (iii) 15-jährige ungewichtete gleitende Mittelwerte dieser Chronologien das Signal betonen (Fig. 10 und 11). Kapitel 4.2 arbeitet ausschließlich mit diesen gefilterten

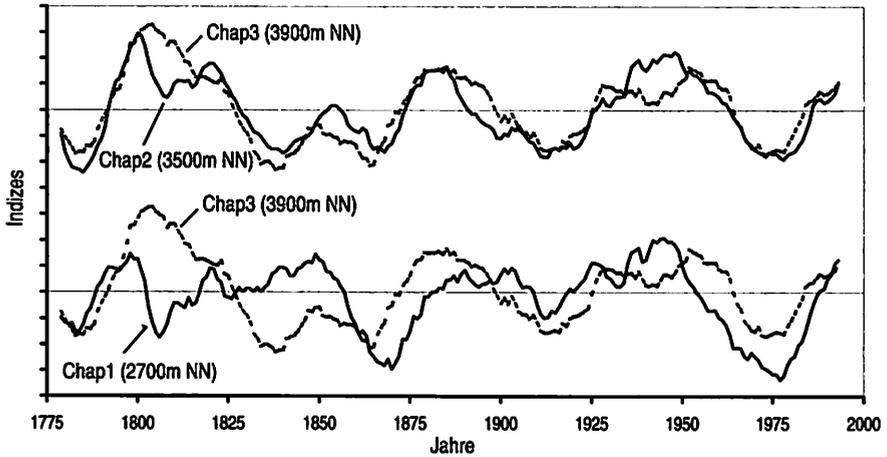


Fig. 13: 8d-Standardchronologien am Transekt des Chaprot Tals (NW-Karakorum)

Chronologien, sowohl bei der Darstellung von Kurven als auch bei der Berechnung von Zusammenhangsmaßen.

Korrelationskoeffizienten zwischen allen Standorten quantifizieren die Zusammenhänge im 8d-indexierten Datensatz. Beispielhaft werden einige Kurvenverläufe dargestellt und visuell verglichen. Dabei stehen (i) Vertikalvergleiche entlang der Transekte, (ii) Vergleiche zwischen räumlich benachbarten und entfernten Chronologien und (iii) Vergleiche zwischen Hochlagenstandorten im Vordergrund. Die Strategie der Beprobung und Lage der Standorte (Tab. 1) sind in Kapitel 1.2 beschrieben.

Figur 13 zeigt die gefilterten 8d-Chronologien des Chaprot Tals, die drei Standorten entlang eines S-exponierten Transekts von 2700 bis 3900m NN entsprechen. Die Zeitspanne reicht von AD 1779 bis 1993, entsprechend der Chronologie-Länge am Standort Chap1. Chap 1 ist ein sogenannter Tieflagenstandort nahe der unteren lokalen Waldgrenze, an dem die Wacholder vergleichsweise schnell wachsen und geringe Alter erzielen (vgl. Kap. 3.1.2). Als Hypothese wurde formuliert, daß das Wachstum von Bäumen an derartigen Standorten eher durch den Niederschlag limitiert wird, Standorte nahe der oberen Waldgrenze eher durch die Temperatur. Für das Low-Frequency Signal stellt sich nun die Frage, inwiefern die Variationen von den vertikalen Verbreitungsgrenzen gleich oder verschieden sind.

Im oberen Teil der Figur sind die indexierten mittleren Zuwachsverläufe von Chap3 (3900m NN) und Chap2 (3500m NN) gegenübergestellt, zwei Standorte, die unmittelbar bzw. ca. 500 m unterhalb der oberen Waldgrenze angelegt wurden. Auf den ersten Blick wird deutlich, daß die Chronologien

	Hoch	Mur	Bon	Gef	Gray	Bag1	Bag2	Bag3	Bag4	Bag5	Cha1	Cha2	Cha3	Hun	Mor1	Mor2	Mor3	Mor4	Sat1	Sat2	Sat3	
Hoch	1	0,02	0,57	-0,16	0,01	-0,10	0,30	0,55	0,11	-0,20	0,02	0,48	0,74	0,38	0,47	0,35	0,59	0,49	0,06	0,53	0,80	
Mur		1	0,70	0,00	0,38	0,08	0,48	0,31	0,12	-0,32	0,04	0,27	0,54	0,59	0,29	0,38	0,49	0,16	0,11	0,72	0,71	
Bon			1	-0,11	0,14	0,12	0,53	0,31	0,27	-0,15	0,00	0,12	0,42	0,15	0,08	0,06	0,23	0,12	0,01	0,40	0,51	
Gef				1	-0,20	0,41	0,10	-0,01	0,11	0,38	0,56	0,14	-0,04	0,05	0,44	0,31	-0,09	0,53	0,11	0,35	-0,17	
Gray	Kigistan				1	0,05	-0,05	-0,19	-0,20	-0,51	-0,41	-0,44	-0,16	0,01	0,08	-0,24	-0,22	-0,36	0,28	0,44	0,37	
Bag1						1	0,52	-0,18	0,73	0,21	0,57	0,11	0,02	0,00	0,16	0,41	0,05	-0,02	0,44	0,38	0,15	
Bag2							1	0,26	0,52	0,29	0,43	0,33	0,36	0,34	0,06	0,37	0,21	0,02	0,28	0,44	0,40	
Bag3								1	-0,18	0,22	0,03	0,51	0,58	0,13	0,54	0,31	0,28	0,56	-0,12	0,33	0,45	
Bag4									1	0,17	0,54	0,11	0,07	0,04	-0,12	0,37	0,23	-0,20	0,45	0,21	0,27	
Bag5						Bagrot				1	0,56	0,35	0,05	-0,06	0,16	0,11	-0,18	0,31	-0,30	-0,21	-0,26	
Cha1											1	0,49	0,24	0,24	0,31	0,56	0,23	0,24	0,07	0,23	0,11	
Cha2												1	0,51	0,50	0,56	0,73	0,57	0,54	-0,24	0,19	0,33	
Cha3											Chaprot		1	0,57	0,51	0,51	0,73	0,53	-0,19	0,44	0,55	
Hun														Hunza	1	0,20	0,50	0,53	0,19	-0,05	0,43	0,44
Mor1															1	0,46	0,27	0,74	0,02	0,52	0,53	
Mor2																1	0,78	0,38	0,18	0,38	0,38	
Mor3																	1	0,33	0,06	0,24	0,50	
Mor4																		1	-0,06	0,36	0,23	
Sat1																			1	0,44	0,27	
Sat2																				1	0,79	
Sat3																					1	

$0,4 \leq r \leq 0,6$   
  $r > 0,6$   
 Fernvergleich  
 → Tieflagenstandort

Signifikanzniveaus (FG = 190)  
 99,9 = 0,235  
 99,0 = 0,186  
 95,0 = 0,142  
 90,0 = 0,119

Tab. 5: Korrelationsmatrix - Vergleich der Standorte (gefilterte 8d-Chronologien, AD 1796-1990)

nahezu identisch verlaufen. Unterstellt man zwischen den Filtern eine lineare Abhängigkeit, so erklärt eine Chronologie über 70% der Varianz der zweiten. Auffällig ist, daß sowohl die Richtung als auch die Amplitude der Kurven in fast allen Zeiten nahezu synchron verlaufen. Lediglich nach AD 1800 liegt Chap2 tiefer und vor AD 1950 geringfügig höher als Chap3.

Die fast durchgehende Übereinstimmung der Standorte Chap2 und Chap3, die aufgrund der Ähnlichkeit als „Hochlagenstandorte“ zusammengefaßt werden können, ist zumindest in Teilen bei den unten abgebildeten Chronologien aufgelöst. Hier sind der höchste (Chap3) und tiefste Standort (Chap1) gegenübergestellt. Das Bestimmtheitsmaß oder der Anteil der erklärten Varianz an der Gesamtvarianz sinkt in diesem Fall auf 0,084. Diese Zahl ist visuell nur teilweise nachvollziehbar. Zwischen AD 1795 und 1865 sind die Chronologien fast gegenläufig. Signale, die von der oberen Waldgrenze kommen, treten nahezu spiegelverkehrt an der unteren auf. Nach AD

1870 jedoch ist zeitweise identische Information in den Jahrringbreiten archiviert worden, auch wenn die Amplituden, wie AD 1900 bis 1925 oder um AD 1975, unterschiedlich sind. Ebenfalls sind zeitlich versetzte Signale, wie der Anstieg um AD 1875 oder der Abstieg nach AD 1950 zu erkennen. Nach AD 1870 ist der Zusammenhang größer, wird jedoch durch die Spiegelung davor aufgehoben.

Da nicht alle Standortchronologien auf diese Weise illustriert werden können, sind die möglichen Kombinationen in einer Kreuzmatrix zusammengefaßt (Tab. 5). Notiert sind einfache Produktmoment-Korrelationskoeffizienten nach Pearson ( $r$ ), die den Zusammenhang zwischen den gefilterten Chronologien wiedergeben. Diese wurden für AD 1796 bis 1990 berechnet, also den Zeitraum, den die kürzeste Standortchronologie Bag3 abdeckt. Somit ist die Anzahl der in die Berechnung einfließenden Jahre  $n = 195$ , die entsprechenden Signifikanzniveaus für  $n = 190$  Freiheitsgrade sind Tabelle 5 beige-fügt. Hellgrau hinterlegt erscheinen Korrelationskoeffizienten zwischen 0,4 und 0,6, dunkelgrau  $> 0,6$ . Ferner sind die pakistanischen Tieflagenstandorte mit einem Pfeil markiert und die Ziffern der sogenannten Fernvergleiche, also zwischen kirgisischen und pakistanischen Standorten, schwarz umrahmt. Durch die Anordnung der Standorte, sortiert nach Ländern und Tälern, entsteht ein umfassendes Bild, das die Ähnlichkeit der  $\delta d$ -Chronologien ausdrückt.

Die Korrelationskoeffizienten der in Figur 13 illustrierten Standorte des Chaprot Tals sind in der Mitte der Tabelle eingetragen. Auch  $r$  verifiziert den engen Zusammenhang zwischen Chap3 und Chap2 und den geringen zwischen Chap3 und Chap1 für die Zeitscheibe AD 1796 bis 1990. Die gleiche Beobachtung kommt aus dem Transekt im Satpara Tal (rechts unten), wo ebenfalls der mittlere Standort (Sat2) eine vermittelnde Stellung zwischen oberer und unterer Waldgrenze einnimmt.

Auch die kirgisischen Standorte des Karagui Tals sind vertikal zueinander angeordnet (Tab. 1), wobei im Gegensatz zu den angesprochenen Transekten die Exposition und lokale Feuchte z.T. erheblich variieren. Die Korrelationsmatrix weist die feuchten Hochlagenstandorte HOCH, MUR und BON als ähnlich aus (links oben). GEF und GRAY haben zueinander und zu den Hochlagen keine Ähnlichkeit.

Figur 14 zeigt die entsprechenden Chronologien seit AD 1625. Diese Zeitscheibe entspricht ungefähr dem jüngsten Standort GEF (AD 1631). Vergleichbar mit den Hochlagenstandorten des Chaprot Tals (Fig. 13) sind die Kurvenverläufe in HOCH, MUR und BON nahezu identisch. Es wird deutlich, daß von diesen Standorten ein ausgezeichnetes homogenes Hochlagensignal kommt, das sehr gut durch eine Mittelkurve wiedergegeben werden kann.

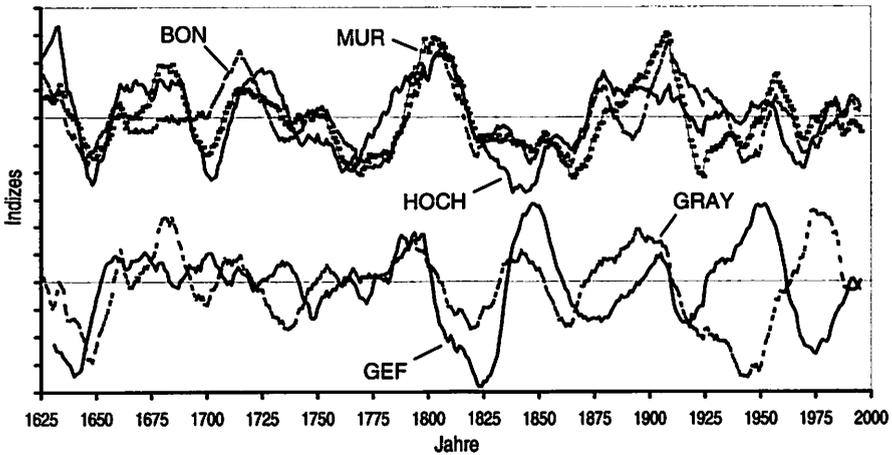


Fig. 14: 8d-Standortchronologien im Karagui Tal (Kirgistan)

Im Bild unten (Fig. 14) zeigen GEF und GRAY teilweise gegenläufige Trends oder, wie zwischen AD 1670 und 1780, keine signifikanten Variationen. GEF ist ein extrem steiler felsiger Trockenstandort in S-Exposition, der ebenso wie GRAY zumindest zeitweise durch andere Faktoren limitiert wurde als die zueinander homogenen Hochlagenstandorte.

Interessante Resultate liefert die Korrelationsmatrix, wenn räumlich nah und fern gelegene Standorte zueinander in Beziehung gesetzt werden. Ergebnisse aus Vergleichen zwischen kirgisischen und pakistanischen Chronologien sind in den obersten fünf Zeilen (Tab. 5) aufgelistet. Hohe Fernkorrelationen sind schwarz umrahmt. Erstaunlicherweise sind in diesem Bereich nicht weniger Grausignaturen vertreten als bei den Vergleichen zwischen Standorten aus verschiedenen Tälern Pakistans. Exemplarisch sollen hier zwei Kombinationen diskutiert werden.

Figur 15 zeigt oben zwei relativ nah gelegene Hochlagenstandorte aus dem Bagrot und Chaprot Tal im Hunza-Karakorum (vgl. Kap. 1.2). Unten sind die höchstgelegenen Standorte des Satpara (Pakistan) und Karagui Tals (Kirgistan) dargestellt. Die entsprechenden Korrelationskoeffizienten für den Zeitraum AD 1796 bis 1990 betragen 0,05 (oben) und 0,80 (unten). Offensichtlich bestehen enge Beziehungen zwischen der oberen Waldgrenze des Tien Shan und der des Satpara Tals im Lee des Nanga Parbat Massivs, das mindestens 500 km Luftlinie entfernt liegt (Sat3 und HOCH). Die Chronologien sind in vielen Teilen nahezu identisch und heben sich deutlich von dem Vergleich zwischen Chap3 und Bag5 ab. Vergleicht man Chap3 mit HOCH, werden auch zahlreiche Parallelen zwischen diesen entfernt liegenden Standorten

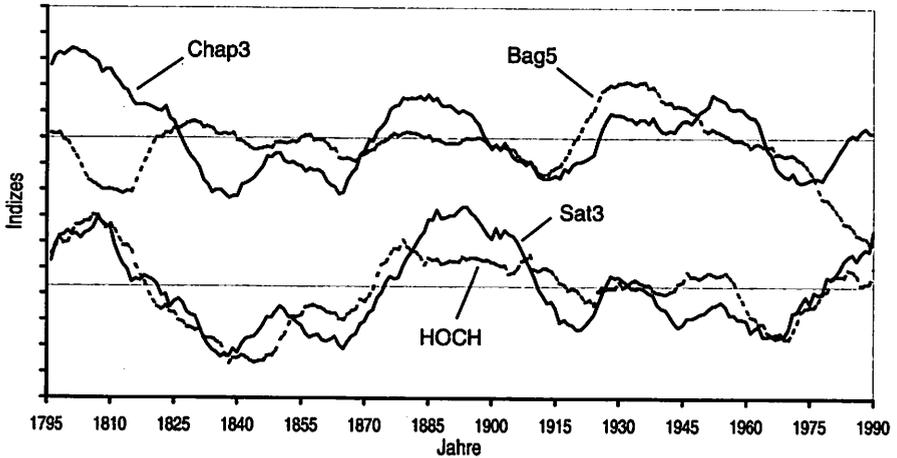


Fig. 15: Ausgewählte 8d-Standortchronologien im Vergleich - Chap3 zu Bag5, Sat3 zu HOCH

deutlich ( $r = 0,74$ ). Ganz anders wachsen die Wacholder an der ebenfalls S-exponierten oberen Waldgrenze des Bagrot Tals (Bag5). Auffällig ist beispielsweise die Zuwachsreduktion von AD 1930 bis zur Waldkante. Überhaupt nehmen die beiden Hochlagenstandorte des Bagrot Tals (Bag3 & 5) eine Sonderstellung ein. Sie korrelieren am wenigsten mit Standorten aus anderen Tälern, und Zusammenhänge treten relativ unsystematisch auf (Tab. 5).

Die Werte und grauen Flächen in der Korrelationsmatrix weisen auf einen systematischen Zusammenhang der pakistanischen Tieflagenstandorte hin. Von den mit einem schwarzen Pfeil markierten Standorten ist lediglich der Koeffizient zwischen Chap1 und Sat1 nicht grau hinterlegt. Wenn auch die Koeffizienten im einzelnen nicht ganz so hoch sind und weit hinter denen der Hochlagenstandorte zurück bleiben, kommt offensichtlich doch eine ähnliche Information von der unteren Waldgrenze, die innerhalb des NW-Karakorums parallelisiert werden kann. Zu bedenken ist jedoch, daß die Tieflagenchronologien vergleichsweise kurz bzw. jung sind.

Zwischen den Hochlagenstandorten sind vor allem die Zusammenhänge innerhalb der Täler außergewöhnlich stark. Grundsätzlich ist bei den Vergleichen zwischen diesen extrem alten Chronologien zu bedenken, daß die Korrelationsmatrix in Tabelle 5 aus Gründen der Vergleichbarkeit auf den Zeitraum AD 1796 bis 1990 beschränkt ist. Die realen Zusammenhänge werden demnach nur für einen vergleichsweise kurzen Ausschnitt, die letzten 195 Jahrringe, quantifiziert.

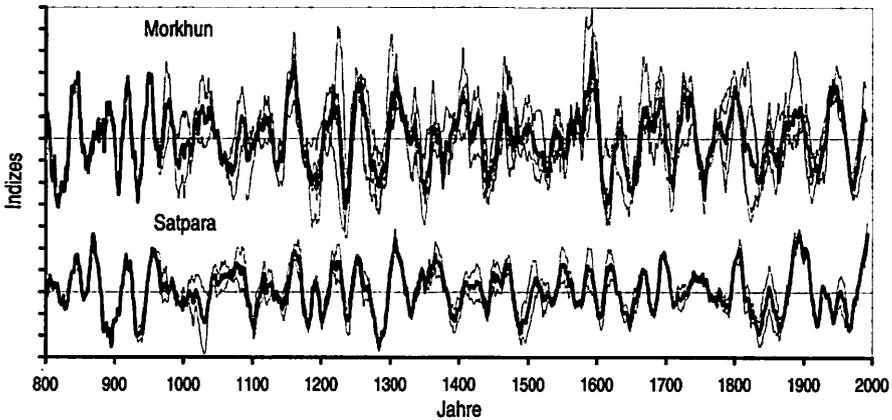


Fig. 16: Hochlagenstandorte (> 3600 NN) Mor1-4 und Sat2 & 3 (dicke Linien = Mittelkurven)

Figur 16 zeigt das Low-Frequency Signal an den vier Hochlagenstandorten des Morkhun Tals (oben) und den zwei des Satpara Tals (unten) seit AD 800. Jeweils fett sind die Mittelkurven aus den Standortchronologien eingezeichnet. Die einzelnen Chronologien haben keine unterschiedlichen Liniensignaturen, da die Zuwachskurven zu eng beieinander liegen. Bis auf die Standorte Mor3 (AD 793) und Sat2 (AD 790) sind alle Reihen komplett abgebildet. Die restlichen Längen betragen Mor1 = AD 964, Mor2 = AD 1060, Mor4 = AD 1137 und Sat3 = 932. Kriterium für diese Zeitscheiben ist, daß mindestens drei Einzelbäume zur Chronologie beitragen. Die einzelnen Kurven können Anhang I entnommen werden.

Auf den ersten Blick wird das bereits in Figur 11 vorgestellte durchgehende Low-Frequency Signal deutlich, wobei die Amplitude in den Standorten des Morkhun Tals signifikant größer ist als im Satpara Tal. Die Kurvenverläufe der einzelnen Standorte (dünne Linien) sind in beiden Tälern fast durchgehend synchron, die Wellenberge bzw. Optima und Wellentäler bzw. Depressionen werden also von allen Standorten in beiden Tälern nachgezeichnet. Zeitweise sind jedoch unterschiedliche Amplituden auszumachen, so z.B. im Morkhun Tal bei den Spitzenwerten vor AD 1600, da die Indexniveaus zwischen den Standorten variieren. Mitte des 19. Jh.s liegt Sat3 tiefer als Sat2 (unten), wohingegen kurz vor AD 1300 beide Standorte des Satpara Tals nahezu deckungsgleich verlaufen.

Insgesamt, und dies kann mit Ausnahme der hochgelegenen Standorte des Bagrot Tals auf die anderen Hochlagenstandorte in Pakistan und Kirgistan übertragen werden, repräsentieren die Talmittelkurven (dicke Linien) die Einzelstandorte ausgezeichnet. Diese Homogenität ist entlang der Zeitachse stabil. Sie kann alleine durch das Klima verursacht worden sein.

Die offenkundigen Parallelen zwischen dem Morkhun Tal (oben) und dem Satpara Tal (unten), die innerhalb der Untersuchungsregion des NW-Karakorums mehr als 100 km Luftlinie voneinander entfernt liegen (vgl. Kap. 1.2), leiten zum nächsten Kapitel über, in dem regionale Vergleiche der Täler (Hochlagenstandorte) innerhalb Pakistans und überregionale Vergleiche zwischen dem NW-Karakorum und dem Tien Shan vertieft werden.

Folgende Regeln können abgeleitet werden:

- Hochlagen- und Tieflagenstandorte sind zumindest in einzelnen Zeitabschnitten unähnlich. Offensichtlich wirken an der unteren Waldgrenze dann andere Wachstumsfaktoren, die homogene Signale in den Einzelbäumen generieren, welche somit als tieflagentypisch angesprochen werden können.
- Die Bäume der Hochlagenstandorte aus dem feuchten Bagrot Tal reagieren in vielen Teilen abweichend von denen der anderen pakistanischen und kirgisischen Standorte. Sie sind von einer weiteren Mittelwertberechnung auszuschließen.
- Die pakistanischen und auch kirgisischen Tieflagenstandorte nehmen eine Sonderstellung ein. Sie korrelieren insgesamt geringer mit den Standorten aus anderen Tälern. Allerdings sind die pakistanischen untereinander auffällig synchron.
- Die spannendsten Signale kommen von den Hochlagenstandorten. Sowohl die pakistanischen als auch die kirgisischen Extremstandorte wachsen sehr einheitlich. Low-Frequency Signale nahe der oberen Waldgrenze sind innerhalb der Täler homogen und deuten auf *einen* klimatischen Faktor, der das Wachstum standortübergreifend steuert.

### 4.3 Regionale und überregionale Vergleiche

Die Beprobungsstrategie, wie sie Kapitel 1.2 ausführlich beschreibt, fokussiert nicht allein die Anordnung der Untersuchungsflächen innerhalb der verschiedenen Tälern, also der Orientierung entlang vertikaler Transekte oder in verschiedenen Expositionen. Im übergeordneten Maßstab wird auch versucht, horizontale Gradienten zu erfassen. Innerhalb der Untersuchungsregion des NW-Karakorums ist die Orientierung der Täler Bagrot, Chaprot und Morkhun entlang eines SW-NE gerichteten negativen Niederschlaggradienten relevant. Als Sonder- oder Referenzlokalität kann das mehr als 100 km südöstlich vorgelagerte Satpara Tal im Lee des Nanga Parbat Massivs angesehen werden. Daher sind auch die Standorte entlang der oberen lokalen Waldgrenzen zunächst einmal unterschiedlich einzustufen. Wenn also die Hochlagenstandorte aus den verschiedenen Tälern des NW-Karakorums verglichen werden, ist eine Hierarchie abnehmender und genetisch unterschiedlicher Niederschläge von Chaprot zu Morkhun und schließlich zu Satpara zu berücksichtigen. Die Hochlagenstandorte des Bagrot Tals bleiben an dieser Stelle unberücksichtigt (vgl. Kap. 4.2).

Weitaus größer sind die klimatisch-ökologischen Unterschiede, wie beispielsweise Kontinentalität oder Wetterlagen, zwischen den pakistanischen und kirgisischen Hochlagenstandorten (vgl. Kap. 1.2). Aus dendrochronologischer Sicht ist daher zunächst nicht zu erwarten, daß die Bäume aus den beiden Untersuchungsregionen gleiche Signale im Zuwachs archivieren.

Bewiesen ist, daß die Einzelbäume an den Standorten in Pakistan und Kirgistan homogen zusammengesetzte mittelfristige Wachstumsvariationen zeigen. Außerdem wurde belegt, daß dieses Low-Frequency Signal v.a. zwischen den Hochlagenstandorten innerhalb der Täler äußerst parallel verläuft. Deshalb werden im folgenden ausschließlich Talmittelkurven aus Hochlagenstandorten verglichen. Zu bedenken ist, daß die einzelnen Talchronologien aus verschiedenen vielen Standortchronologien zusammengesetzt sind. Im kirgisischen Karagui Tal sind dies drei Standorte (HOCH, MUR, BON), in den pakistanischen Tälern Chaprot zwei (Chap2, Chap3), in Morkhun vier (Mor1 bis Mor4) und in Satpara zwei (Sat2, Sat3). Hinzu tritt die Chronologie HUN (Pakistan) als selbständige Reihe. Die Talchronologien sind einfache Mittelkurven aus den Hochlagenstandorten. Dadurch kommt jeder Untersuchungsfläche die gleiche Bedeutung zu, unabhängig davon, daß z.B. die Chronologie Chap2 aus 15 Bäumen und Chap3 aus nur 9 Bäumen zusammengesetzt ist. Umgekehrt gilt, daß die wenigen Wacholder aus Chap3 jeweils ein größeres Gewicht an der Talchronologie haben. Die „gewichteten“ maximalen Belegungsdichten in den einzelnen Tälern sind: Karagui = 51, Chaprot = 24, Morkhun = 48, Satpara = 35 und Hunza = 7 Bäume.

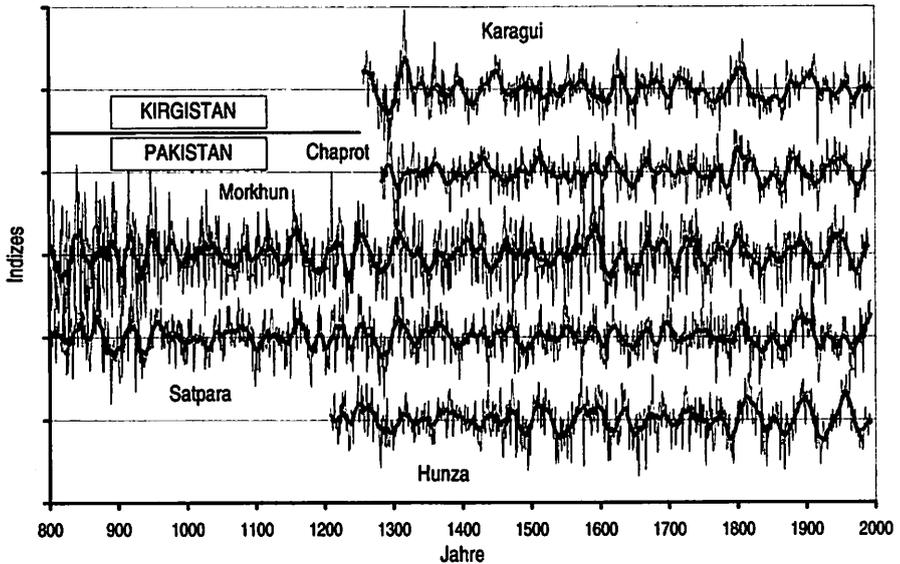


Fig. 17: 8d-Chronologien der Täler im Vergleich - Kargui, Chaprot, Morkhun, Satpara und Hunza

Figur 17 zeigt das Low-Frequency Signal der entsprechenden Talchronologien. Dargestellt sind 8d-indexierte Zuwachsreihen, wobei die dünnen Linien das Signal ohne Filterung und die dicken Linien die 15-jährigen ungewichteten gleitenden Mittelwerte wiedergeben. Alle Reihen sind durch einen Offset von 100 Indexwerten vertikal zueinander versetzt. Die Länge der Kurven entspricht dem jeweils ältesten Standort in einem Tal (vgl. Anhang I).

Auf den ersten Blick wird wieder das durchgehende Low-Frequency Signal in allen Tälern evident. Derartige Mittelkurven sind immer generalisierend. Sie reduzieren den Einfluß von Ausreißern, gemeinsame Trends werden betont, gegensätzliche heben sich auf. Zahlreiche Wachstumsschwankungen – und dies ist die wesentliche Erkenntnis – sind zwischen den pakistanischen Tälern parallel. Zum Beispiel sind im Chaprot, Morkhun, Satpara und Hunza die Wacholder um AD 1900 besser gewachsen als davor und danach. Vor AD 1600 ist in allen vier Tälern eines der vielen Optima ausgebildet, wenn auch von verschiedener Intensität und zeitlicher Persistenz. Interessant sind auch die parallelen Variationen in den ältesten Abschnitten von Morkhun und Satpara. Insbesondere vor der Jahrtausendwende sind mehrere synchrone Zuwachszunahmen und -abnahmen zu erkennen. Offensichtlich wird auch ein Zusammenhang zwischen den pakistanischen Tälern und dem kirgisischen Karagui Tal.

	Karagui	Chaprot	Morkhun	Satpara	Hunza	Mittel
Karagui		0,19	0,24	0,34	0,29	0,26
Chaprot	0,19		0,31	0,27	0,32	0,27
Morkhun	0,18	0,41		0,34	0,36	0,31
Satpara	0,27	0,39	0,39		0,29	0,31
Hunza	0,13	0,10	0,01	0,11		0,31
Mittel	0,19	0,19	0,25	0,29	0,09	0,20/0,29

Tab. 6: Korrelationskoeffizienten Talchronologien AD 1283-1990 (oben: mit Filter / unten: ohne Filter)

Wie eng die Beziehungen zwischen dem NW-Karakorum und dem Tien Shan im Detail sind, geht aus Tabelle 6 hervor. Hier sind die Korrelationskoeffizienten nach Pearson ( $r$ ) aus Vergleichen zwischen den Tälern dargestellt. Rechts oben in den Spalten zwei bis fünf stehen die Koeffizienten zwischen den gefilterten,

links unten in den Zeilen zwei bis fünf (kursiv) die zwischen den nicht gefilterten Chronologien. Der Berechnungszeitraum ist AD 1283 bis 1990, was jeweils 708 Wertepaaren entspricht. Somit sind alle  $r$  zwischen den gefilterten Chronologien (auch Chaprot zu Karagui = 0,19) höchst signifikant.<sup>27</sup> Spalte sechs und Zeile sechs (Mittel) geben die Mittelwerte der Korrelationskoeffizienten für die einzelnen Standorte an. Beispielsweise korreliert die gefilterte Karagui-Chronologie im Mittel mit 0,26 zu allen anderen geglätteten Reihen. Rechts unten sind die Mittelwerte dieser Berechnungen eingetragen.

Im Mittel sind die Zusammenhänge zwischen den Filtern größer als zwischen den Wachstumsvariationen von Jahr zu Jahr (0,29 zu 0,20). Wenn man die das Low-Frequency Signal betonenden gefilterten Chronologien näher betrachtet, fällt auch die geringere Spannweite in den Einzelwerten auf. Die  $r$  reichen im ersten Fall von 0,19 (Chaprot zu Karagui) bis 0,36 (Hunza zu Satpara), im zweiten von 0,01 (Hunza zu Morkhun) bis 0,41 (Morkhun zu Chaprot). Das Karagui Tal hat in der Summe (gefilterte Chronologien) mit 0,26 die geringste Ähnlichkeit. Jedoch sind die Parallelen zwischen dem kirgisischen und den pakistanischen Tälern auch in diesem rechnerischen Vergleich evident.

Bezüglich der interannuellen Variationen erzielen Morkhun und Chaprot die größten Werte. Der Zusammenhang von 0,41 bei 708 Wertepaaren drückt die extrem hohe Synchronität des Wachstums von Jahr zu Jahr aus. Dies ist

<sup>27</sup> Zur Verdeutlichung, und um die absolut geringen Zahlen besser einschätzen zu können, sei kurz auf die entsprechenden t-Werte hingewiesen. Bei 706 Freiheitsgraden (FG), wie im vorliegenden Fall, approximiert die t-Verteilung eine Normalverteilung. Dementsprechend nehmen die kritischen t-Werte systematisch ab. Korrelationskoeffizienten von  $r = 0,2$ ,  $r = 0,3$  und  $r = 0,4$  ergeben t-Werte von 5,54, 8,76 und 12,65. Zum Vergleich: Bei 100 FG wird das 99,99%-ige Signifikanzniveau bereits bei einem t-Wert von 3,09 erreicht.

nicht verwunderlich, da Morkhun und Chaprot zwei vergleichsweise nah beieinander liegende Täler sind. Auffällig ist, daß Hunza bei diesen Vergleichen gegenüber den Berechnungen mit gefilterten Chronologien weit zurück fällt (Mittel = 0,09). Die Maskierung des interannuellen Anteils durch die Filterung und Fokussierung auf mittelfristige Wachstumsschwankungen, also auf das „originäre Signal“, wirkt sich bei dieser gering belegten Chronologie positiv aus.

Die Korrelationsmatrix zeigt deutlich, daß das Low-Frequency Signal zwischen den pakistanischen Tälern zusammengefaßt werden kann. Die hohen Werte des Karagui Tals bei den geglätteten Chronologien belegen außerdem, daß ganz offensichtlich signifikante Beziehungen zwischen den Untersuchungsregionen im Tien Shan und NW-Karakorum bestehen. Räumliche Distanzen entlang der horizontalen klimatisch-ökologischen Gradienten verhindern sowohl innerhalb des NW-Karakorums als auch zwischen Pakistan und Kirgistan nicht, daß in den mittleren Frequenzen die Wacholder sehr ähnliche Wachstumsreaktionen besitzen. Low-Frequency Signale von der oberen Waldgrenze des Satpara Tals sind trotz einer Horizontaldistanz von mehr als 100 km mit Low-Frequency Signalen aus dem Chaprot oder Morkhun Tal parallelisierbar. Mittelfristige Wachstumsvariationen aus dem Karagui Tal harmonisieren mit denen der pakistanischen Täler. Zwischen dem südlichsten Standort des NW-Karakorums (Morkhun) und dem Karagui Tal im Tien Shan liegen die Karakorum Hauptkette, der östliche Hindukusch und der Pamir!

Figur 18 zeigt oben die Talchronologie des kirgisischen Karagui (gestrichelte Linien) und eine Chronologie der pakistanischen Täler Chaprot, Morkhun, Satpara und Hunza, wobei wiederum die geglätteten Chronologien als dicke Linien dargestellt sind. Die interannuellen Variationen (dünne Linien) sollen lediglich die reale Variationsamplitude illustrieren, während ein 15-jähriger ungewichteter Mittelwert die Trends glättet. Die Zeitscheibe der Abbildung entspricht dem Alter der Karagui Chronologie (AD 1258), die maximalen Belegungsdichten sind: Karagui (Tien Shan) = 51 und Chaprot + Morkhun + Satpara + Hunza (NW-Karakorum) = 114 Wacholder. Unten (B) sind als Flächen die Differenzen<sup>28</sup> und als Kurve die Korrelationskoeffizienten

<sup>28</sup> Hinter den grauen Flächen stehen drei Arbeitsschritte: (a) Berechnung der Differenzen zwischen den gefilterten Chronologien, (b) Berechnung der Standardabweichung dieser Differenzen (= 6,37 Indexwerte) und (c) Darstellung der Differenzen, wenn in mehr als fünf aufeinanderfolgenden Jahren die Standardabweichung von 6,37 überschritten wird. Die Ordinate setzt bei 6,37 an, die maximale Differenz wird AD 1318 mit 31,8 Indexwerten erreicht.

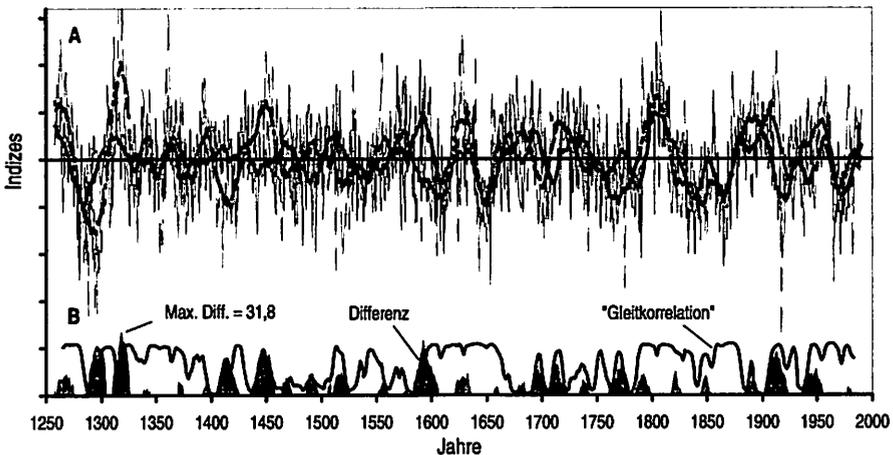


Fig. 18: Ländervergleich Kirgistan zu Pakistan (Hochlagen), A : Chronologien (unterbrochene Linie = Kirgistan), B : Flächen = Differenzen, Kurven = 15-jährige Gleitkorrelation zw. gefilterten Chronologien

("Gleitkorrelation")<sup>29</sup> zwischen den gefilterten Länderchronologien aufgetragen.

Auch bei einer weiteren Mittelwertberechnung im NW-Karakorum, also der Zusammenfassung von vier Tälern, bleiben die Low-Frequency Signale erhalten. Es gilt nach wie vor, daß gemeinsame Trends relativ verstärkt werden und gegenständige sich aufheben. Was schließlich in der ungewichtet zusammengefaßten pakistanischen Chronologie verbleibt, sind die Variationen, die in allen Tälern mit Ausnahme des Bagrot an der oberen Waldgrenze zu beobachten sind. Daß die Wachstumsschwankungen der insgesamt 114 Bäume sehr harmonisch verlaufen, wurde hinlänglich verifiziert. Das so generierte pakistanische Low-Frequency Signal ist in vielen Teilen parallel zu den mittelfristigen Wachstumsvariationen aus Kirgistan. Die geglätteten Chronologien korrelieren von AD 1258 bis 1990 mit  $r = 0,40$  (733 Wertepaare!). Und auch in den hochfrequenten Anteilen gibt es zahlreiche Übereinstimmungen, denn die nicht gefilterten Chronologien korrelieren immerhin noch mit  $r = 0,30$ .

<sup>29</sup>  $r$  wird als Gleitkorrelation  $G$  bezeichnet, wenn der Zusammenhang in einem definierten Zeitfenster quantifiziert wird und dieses Fenster entlang der Zeitachse gleitet. Als Ausschnitt wurden 15 Jahre gewählt. Somit resultiert z.B. der Kurvenpunkt in AD 1983 ( $G_{1983}$ ) aus der Korrelation zwischen den gefilterten Chronologien von AD 1976 bis 1990,  $G_{1982}$  gibt die Korrelation von AD 1975 bis 1989 wieder. Die Spannweite reicht von +1 bis -1. Die Kurve der Gleitkorrelation erfaßt „nur“ die Jahre von AD 1265 bis AD 1983, da sonst an den Enden das Zeitfenster für die Korrelation (15 Jahre) gekürzt werden müßte.

Auffällig sind verschiedene synchron verlaufende Wellenberge und -täler, wie um AD 1800 (Optimum) oder nach AD 1830 (Depression). Phasen mit größerer Amplitude, wie nach AD 1800 bis 1990 können ebenso beobachtet werden (Kirgistan und Pakistan), wie Phasen geringer Amplitude, wie zwischen AD 1350 und 1550 (v.a. Pakistan). Es existieren Perioden, in denen die Richtungen, nicht aber die Amplituden übereinstimmen. Dies trifft beispielsweise auf das sekundäre Maximum um AD 1850 zu. Auch können im Detail Parallelen bei kleineren Richtungsänderungen, so z.B. an der sekundären Depression um AD 1940, festgehalten werden (in Pakistan kleiner). Auffällig sind darüber hinaus Abschnitte, in denen zwar die Richtung übereinstimmt, die Trends aber zeitlich versetzt beginnen oder enden. Beispiele sind der Anstieg aus der Depression um AD 1300, wo die kirgisischen Bäume „verspätet“ reagieren, oder der Anstieg vor AD 1800, der in Kirgistan früher einsetzt. Hier verhalten sich die Chronologien gleichläufig, wenn auch zeitlich versetzt.

Die vertikalen Abstände kommen in den Differenzflächen (B) zum Ausdruck. Jedoch bleiben die Vorzeichen, d.h., ob gegenständige oder parallele Kurvenverläufe ausgebildet sind, unberücksichtigt. Andererseits üben sie einen massiven Einfluß auf die Gleitkorrelation aus. Ein gutes Beispiel ist der Abschnitt kurz vor AD 1300. Zunächst nehmen die Zuwächse in Kirgistan länger ab. Die Korrelationskoeffizienten werden negativ, die Differenzfläche vergrößert sich jedoch zunächst nur geringfügig. Dann steigen beide Chronologien an, wobei die Abstände trotz gleichen Vorzeichens zunehmen. Rasch reagiert die Gleitkorrelation mit einer Zunahme bis auf nahe +1. Gleichzeitig weist die Differenzfläche die Chronologien als unterschiedlich aus. Auf diese Weise können alle Zeitabschnitte diskutiert werden. Häufig treten hohe positive Korrelationen und große Differenzen gleichzeitig auf, wie es sehr schön um AD 1700 zu erkennen ist (zeitlich versetzte Trends). Sicher sollten die realen Abstände, gemessen durch die Differenzen und die Korrelationskoeffizienten nicht unabhängig voneinander betrachtet werden. Den Chronologien wird man am ehesten gerecht, wenn beide Parameter gemeinsam angewandt werden.

Abschließend ist festzuhalten: Es existieren zahlreiche Parallelen im Zuwachs der pakistanischen und kirgisischen Bäume. Insbesondere nach AD 1800 und in den ältesten Abschnitten bis mindestens AD 1380 ist die Synchronität verblüffend. Auffallend parallel ist auch die Phase zwischen AD 1600 und ca. 1750. Tatsächlich gegenständig sind die Abschnitte um AD 1450 bis AD 1525 und nach AD 1750 bis 1780. Ansonsten finden zeitlich versetzte aber gleichartige Trends statt.

Nachdem die Homogenität der Einzelbäume an den Standorten und anschließend v.a. die der Hochlagenstandorte zueinander (ohne Bagrot) belegt wurden, zeigen die Figuren in diesem Kapitel, daß zumindest in verschiedenen Zeitabschnitten Wacholder aus Kirgistan und Pakistan gleichartig wachsen. An anderer Stelle wurde bereits auf das Klima verwiesen, das die Jahringbreiten limitiert und zu synchronen Zuwachskurven zwischen den Standorten führt. Die regionalen Parallelen an der oberen Waldgrenze legen den Schluß nahe, daß die Temperaturen das Jahringwachstum maßgeblich steuern. Nun, da das Low-Frequency Signal aus Pakistan Ähnlichkeit mit den mittelfristigen Variationen aus Kirgistan zeigt, scheint die Temperatur als einziger Faktor in Frage zu kommen, der großräumig synchrone Reaktionen im Baumwachstum verursacht (vgl. Kap. 6.2, 6.4).

Ob hinter klimatischen Schwankungen andere, sogenannte „Forcing Factors“ (Sonne?) stehen und die Klimatelemente nur indirekte „Überträger“ eines solaren Signals sind, wird an dieser Stelle nicht vertieft. Es liegt indes nahe, diesen Zusammenhang systematisch zu überprüfen. Fest steht, daß Aussagen zur klimatischen Sensitivität pakistanischer Hochlagenbäume mit Einschränkung auch für kirgisische Hochlagenstandorte gültig sind und umgekehrt.

#### 4.4 Säkulare Trends

Um mehrhundertjährige Wachstumsvariationen bzw. säkulare Trends zu rekonstruieren, verwendet die Dendrochronologie entweder zusammengesetzte Chronologien oder sehr alte Bäume. Bei der Felderhebung für die vorliegende Studie konnten 17 sogenannte „tausendjährige“ Wacholder beprobt werden. Sie dienen als Grundlage für die Untersuchung des Very-Low-Frequency Signals. Bevor die extrem alten Zeitzeugen befragt werden, ist allerdings eine Diskussion der Anpassungen sinnvoll, die bei der  $\delta d$ -Indexierung an die Rohwertkurven angelegt werden. An verschiedenen Stellen wurden die resultierenden Indexwerte präsentiert, ihre Homogenität untersucht und auf das paläoklimatische Potential der verbleibenden Wellenlänge verwiesen. Was aber geht bei der Indexierung verloren? Werden möglicherweise systematische Informationen aus dem Datensatz eliminiert?

Figur 19 zeigt exemplarisch die  $\delta d$ -Anpassungen der Bäume am kirgisischen Hochlagenstandort BON. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, daß hier *nicht* geglättete oder gefilterte Indexserien dargestellt sind, die aus der  $\delta d$ -Indexierung resultieren. Vielmehr sind die 101-jährigen modellierten Filter illustriert, die an die Rohwertkurven der Bäume angelegt werden. Durch diese 101-jährigen Filter werden dann in einem zweiten Schritt die Rohwerte dividiert

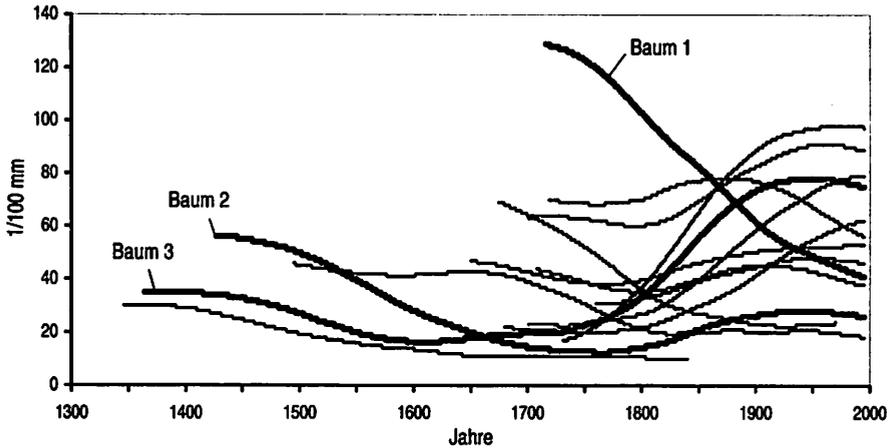


Fig. 19: 8d-Anpassungen für die Indexierung in Standort BON (Kirgistan)

(vgl. Kap. 2.1: 8d-Indexierung). Es wurde bereits betont, daß diese Form der Indexierung alle Trends oberhalb einer Länge von 100 Jahren approximiert und eliminiert. Die Frage ist nun, ob die angelegten 8d-Filter zwischen den einzelnen Bäumen eines Standorts chaotisch oder systematisch verlaufen. Im ersten Fall ist das Risiko, klimatische Information zu nivellieren, gering. Zeigen die Filter aber Parallelen, ist die Gefahr groß, im Baumwachstum gespeicherte klimatische Signale herauszunehmen. Figur 19 dient als Einführung in die Thematik, denn die Darstellung von Anpassungen ist bisher in der Dendrochronologie unüblich.

Insgesamt sind 14 Bäume des Standorts BON abgebildet, wobei 3 Filter mit einer dickeren Linie hervorgehoben erscheinen. Auf der Ordinate steht nach wie vor die ursprüngliche Dimension von 1/100 mm. Leicht kann man sich um jede Anpassung die jährlichen Variationen vorstellen, die dann jeweils durch den Filter dividiert werden. Baum 1 war zu Beginn schnellwüchsig, hatte aber Zeit seines Lebens mit schlechter werdenden Bedingungen zu kämpfen. Die Jahrringe nahe der Waldkante sind bezogen auf die gesamte Lebensspanne die schmalsten. Dieser fortwährende, über fast drei Jahrhunderte andauernde Trend kann sicher nicht als Alterstrend (SCHÄR et al. 1987) bezeichnet werden. Überhaupt gelingt an keinem der 14 Bäume von Standort BON eine Einteilung in juvenile und adulte Phase (BRÄKER 1981). So ist Baum 3 zu Beginn über fast 50 Jahre ausgeglichen gewachsen, reduziert dann die kambiale Aktivität, legt nach AD 1800 aber wieder zunehmend breitere Jahrringe an. Ähnliche Trends – wenn auch mit anderen Amplituden – kommen von Baum 2.

Werden alle Anpassungen gemeinsam betrachtet, so können bis ca. AD 1800 und nach AD 1900 keine signifikanten Trends erkannt werden, die von allen oder einer Mehrzahl von Bäumen nachgezeichnet werden. Im 19. Jh. jedoch nehmen bis auf wenige Ausnahmen (z.B. Baum 1) die Jahringbreiten zu und persistieren im 20. Jh. auf einem erhöhten Niveau. Umgekehrt bedeutet dies, daß zahlreiche Zuwachskurven durch die  $\delta d$ -Indexierung nach AD 1900 reduziert, und vor AD 1800 relativ angehoben werden. Hier besteht die Gefahr, daß die gewählte Standardisierung ein klimatisches Signal nivelliert hat, das in einer Wellenlänge oberhalb von 100 Jahre stattfindet.

Um derartige Aussagen für den gesamten Datensatz machen zu können, wäre die Diskussion von 389 Anpassungen notwendig, denn diese Zahl an  $\delta d$ -Indexierungen ist gerechnet worden. Aus Figur 19 geht indes hervor, daß vor allem die alten Bäume potentielle Signale zeigen können, die über mehrere Jahrhunderte hinweg retuschiert wurden.

Figur 20 zeigt alle Anpassungen an Bäume mit mehr als 500 Jahringen aus Pakistan und Kirgistan. Die dargestellten 101-jährigen Filter von insgesamt 97 Bäumen sind individuell auf Null normiert worden.<sup>30</sup> Im Gegensatz zu Figur 19 hat das den Vorteil, daß gering- und schnellwüchsige Bäume auf einem Niveau liegen. Der Gesamteindruck zeigt, in welchen Jahrhunderten die  $\delta d$ -Indexierung Rohwertkurven reduziert hat und in welchen die resultierenden Indexwerte angehoben wurden. Somit ist das Ziel dieser Figur nicht, einzelne Trends zu diskutieren. Das ist bei der Fülle an Anpassungen auch nicht möglich. Viel spannender ist die Frage, ob in einzelnen Zeitabschnitten die Filter eher über oder unter Null liegen.

Die Mehrzahl der Bäume wächst innerhalb einer Spannweite von -0,2 und +0,2 mm. Vor allem nach AD 1500 sind zwischen -0,1 und +0,1 ausschließlich Rauten erkennbar, die aus einer Vielzahl von gekreuzten Reihen resultieren. Mit Pfeilsignaturen sind Bereiche gekennzeichnet, in denen mehrere Anpassungen Alterstrend assoziieren. In Wahrheit zeigen im gesamten Datensatz nur wenige Rohwertkurven dieses biologische Rauschen. Ein Grund dafür ist in der Wuchsform zu suchen (vgl. Kap. 3.1.1). Bei der überwiegenden Zahl der Bohrkern wurde das Mark nicht getroffen. Häufig fehlen mehr als 100 Jahre bis zum innersten Ring in Brusthöhe. Verschiedene von den mit Pfeil markierten Reihen steigen außerdem im 19. und 20. Jh. wieder an.

---

<sup>30</sup> Das Diagramm entspricht inhaltlich Figur 19 bis auf die Ausnahme, daß von jeder Anpassung die Residuen zu den Mittelwerten gerechnet wurden. Vereinfacht ausgedrückt ist der Mittelwert jeder einzelnen Reihe auf Null verschoben worden. Deshalb sind auf der Ordinate die Abweichungen in 1/100 mm aufgetragen.

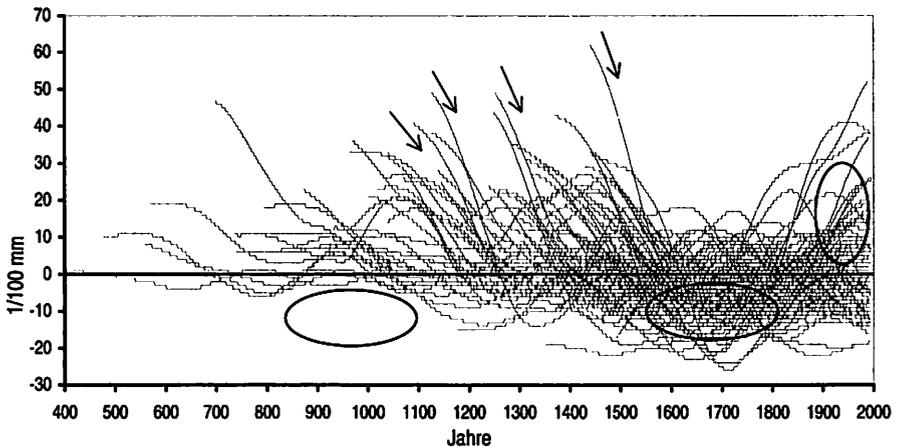


Fig. 20: 8d-Anpassungen von 97 Bäumen (> 500 Jahre) aus Pakistan und Kirgistan (auf Null normiert)

Die ovalen Kreissignaturen unterhalb der Nulllinie markieren Bereiche, in denen keine (ca. AD 900 bis 1000) bzw. sehr viele Anpassungen (ca. AD 1600 bis 1800) liegen. Gleichzeitig sind oberhalb der Nulllinie zahlreiche (ca. AD 900 bis 1000) bzw. weniger (ca. AD 1600 bis 1800) Überschreitungen zu erkennen. Auch das bereits aus Figur 19 bekannte Phänomen, daß seit dem 19. Jh. ein Trend zu erhöhten Zuwächsen zu verzeichnen ist, hebt ein ovaler Kreis hervor. In der Summe bedeutet dies, daß (i) vor der Jahrtausendwende (AD 1000) zahlreiche Zuwachskurven durch die 8d-Indexierung „heruntergeklappt“ werden, daß (ii) vor allem zwischen AD 1600 und 1800 häufig „erhöht“ wird und daß (iii) im 20. Jh. tendenziell reduziert wird. Diese Informationen scheinen systematischer Natur zu sein. Es sind Indizien für Very-Low-Frequency Signale oder säkulare Trends, die gemeinsam mit dem nicht erwünschten Rauschen erfaßt und bei der 8d-Standardisierung nivelliert werden.

Diese Indizien verdichten sich zu einem verifizierten Very-Low-Frequency Signal, wenn eine Auswahl extrem alter Wacholder untersucht wird. Tabelle 7 gibt eine Übersicht über die sogenannten „tausendjährigen“ Wacholder, die an pakistanischen Hochlagenstandorten beprobt werden konnten. Insgesamt fließen 17 Bäume aus vier Tälern in die Auswertung ein. Sie haben einen mittleren Zuwachs von nur 0,21 mm pro Jahr (Baum mit min. Zuwachs = 0,13 mm/a, max. = 0,26 mm/a). Die maximalen Alter reichen in allen Standorten bis in das letzte Jahrtausend (Spalte 4).

Um eine biologische Beeinflussung durch den Alterstrend auszuschließen, werden alle Einzelserien gekürzt. Das bedeutet, daß bei sieben Bäumen, an denen aufgrund der Krümmung der Jahringgrenzen auf den Bohrkernen ei-

Tal	Standort	Bäume	Max. Alter
Morkhun	Mor1	3	AD 476
	Mor2	1	AD 968
	Mor3	6	AD 554
Satpara	Sat2	3	AD 737
	Sat4	3	AD 388
Hunza	Hun	1	AD 568

Tab. 7: 1000-jährige Wacholder, Pakistan

ne Kernschätzung bis zum Markalter möglich ist, jeweils 100 Jahrringe abgeschnitten werden. Bäume ohne Kernschätzung, die also weitaus älter sind, werden sicherheitshalber um 50 Jahrringe gekürzt. Ein Test der resultierenden Mittelkurven vor und nach dieser Maßnahme ergibt zwar keine signifikanten Unterschiede, allerdings wird wegen der potentiellen Problematik, die hinter dem Alterstrend und der gewählten einfachen Indexierung steht, die gekürzte Variante verwendet.

Nach der Division aller Zuwachskurven durch die jeweiligen individuellen Mittelwerte (und Multiplikation mit 100) rücken die resultierenden Reihen zusammen und vermitteln einen Gesamteindruck über langfristige Zuwachszunahmen und -abnahmen seit AD 618 (Fig. 21, oben). Diese einfachste Form der Indexierung tangiert langwellige Variationen nicht. Insbesondere kann ein potentielles Very-Low-Frequency Signal, wenn es vorhanden ist, nicht eliminiert werden (vgl. Kap. 2.1: *ad*-Indexierung).

In Figur 21 (oben) sind als schwarzes Band die 17 Zuwachskurven der tausendjährigen Wacholder dargestellt. Aufgrund der großen Zeitscheibe und der ähnlichen Indexwerte pro Jahr sind einzelne Reihen nicht mehr erkennbar. Die weiße Reihe im Zentrum des schwarzen Bands ist die Mittelkurve aus den Einzelserien. An ihr können sehr deutlich (i) Variationen von Jahr zu Jahr<sup>31</sup> und (ii) langfristige Trends erkannt werden.

Die Zuwächse sind bis ca. AD 1000 signifikant höher als in allen darauffolgenden Phasen. Die breitesten Jahrringe sind im Mittel zwischen AD 900 und 1000 angelegt worden. Danach wachsen die Wacholder bis ca. AD 1200 zunehmend schlechter und erreichen einen ersten Tiefpunkt. Auf diesem Niveau persistieren die Jahrringbreiten bis ca. AD 1500, machen eine synchrone Wellenbewegung mit und erreichen schließlich nach AD 1600 den absoluten Tiefpunkt. Schließlich wachsen die Bäume im Anschluß an einen etwas steileren Anstieg bis zur Waldkante wieder zunehmend besser, ohne aber das Niveau vor AD 1000 auch nur annähernd zu erreichen.

Wesentlich bei der Betrachtung derartiger Trends ist – wie immer – die Homogenität der Einzelbäume, die zur Mittelkurve beigetragen haben. In Figur

<sup>31</sup> Die gemeinsame Überlappung zwischen allen Serien, also das Zeitfenster, in dem alle vertreten sind, sinkt aufgrund nicht identifizierbarer und deshalb fehlender Jahrringe bei einigen Serien nahe der Waldkante auf 667 Wertepaare. Die mittlere Korrelation aus allen möglichen Kombinationen (Interseries-Correlation) beträgt 0,25 und verifiziert den Zusammenhang zwischen den tausendjährigen Wacholdern.

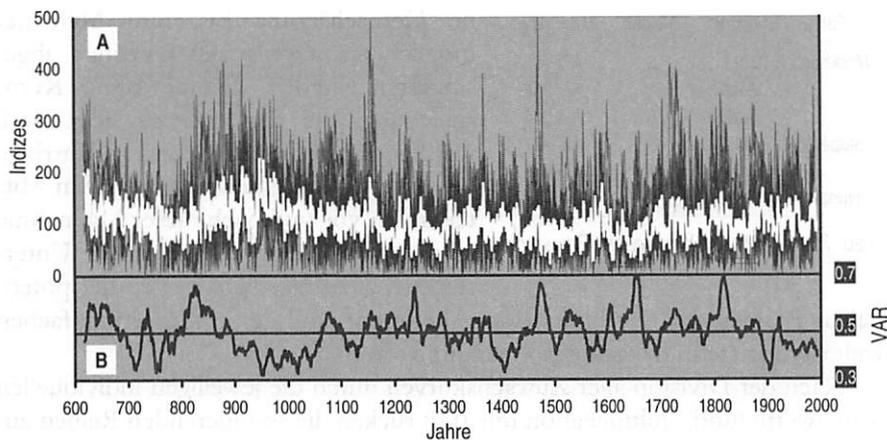


Fig. 21: 17 "tausendjährige" Wacholder aus Pakistan (ad-indexiert) und Streuung (VAR)  
**A**: Einzel- und Mittelkurve (weiß), **B**: Variationskoeffizient (15-jähriger gleitender Mittelwert)

19 B sind deshalb die geglätteten Variationskoeffizienten (15-jährige Filter) von AD 618 bis 1993 dargestellt. Die Einzelkurven streuen in einer Amplitude von 0,3 bis 0,7 in Abhängigkeit von der Zeit. Die wesentliche Erkenntnis ist, daß in keiner langfristigen Phase, also über mehrere Jahrhunderte hinweg, signifikante Unterschiede in der Streuung dokumentiert werden. Vielmehr schwankt der Variationskoeffizient um ein mittleres Niveau von 0,48. Auffällige Peaks treten kurz vor AD 1500, um AD 1660 und nach AD 1800 auf. Im Bild nachzuvollziehen (oben) ist ausschließlich die reduzierte Homogenität vor AD 1500, da zumindest eine Serie auffallend nach oben abweicht. Für die hier diskutierten säkularen Trends ist wichtig, daß die erhöhten Zuwächse vor AD 1000 und insbesondere der langfristige Abstieg bis AD 1200 vom Gesamteindruck ähnlich (teilweise sogar geringer) streuen als die jüngeren Abschnitte in diesem Jahrtausend.

Wenn die weiße Mittelkurve aus Figur 21 mit einem 15-jährigen gleitenden Mittelwert geglättet wird, kommen die in den vorangegangenen Kapiteln ausführlich besprochenen Low-Frequency Variationen zum Vorschein. In Figur 22 ist die Mittelkurve mit einer dünnen und der Filter daraus mit einer dicken Linie dargestellt. Mit jeder weiteren Filterung werden die generellen Trends stärker hervorgehoben. Ein 401-jähriger gleitender modellierter Mittelwert<sup>32</sup> (graue Flächen) illustriert die optimalen Bedingungen vor der Jahr-

<sup>32</sup> Der 401-jährige Filter entspricht in der Berechnung den 101-jährigen gleitenden Mittelwerten der *8d*-Indexierung (vgl. Kap. 2.1). Ein wesentlicher Vorteil dieser Kernel-Schätzung liegt darin, das die Enden – wie sonst bei langen Filtern üblich – nicht abgeschnitten werden müssen (GASSER et al. 1984).

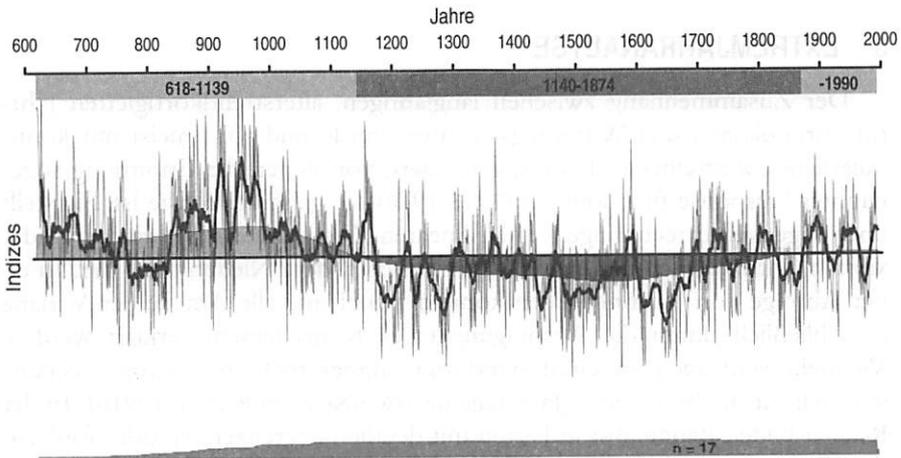


Fig. 22: Very Low Frequency Signal von 17 "tausendjährigen" Wacholdern seit AD 618

tausendwende, die zunehmend geringer werdenden Ringbreiten bis schließlich um AD 1600 und den Wiederanstieg bis zur Waldkante. Demnach wird von AD 618 bis 1139 der Gesamtmittelwert übertroffen und zwischen AD 1140 und 1874 unterschritten. Nach AD 1875 liegen die Zuwächse wieder über dem Durchschnitt der letzten fast 1400 Jahre, erreichen jedoch bei weitem (noch?) nicht das Niveau des letzten Jahrtausends.

Die immerhin 17 tausendjährigen Bäume zeichnen homogene Trends nach, die allerdings vor AD 1000 durch zunehmend weniger Individuen belegt sind. Aus Gründen der Repräsentativität endet die Darstellung AD 618 bei vier Bäumen (Fig. 22 unten: Belegungsdichte). Das Very-Low-Frequency Signal, ausgedrückt durch den 401-jährigen Filter, wird zu allen Zeiten durch gegenläufige mittelfristige Wachstumsvariationen (dicke Kurve) und Einzeljahre „durchbrochen“. Das bedeutet, daß vor AD 1139 immer wieder Jahrringe auffallend schmal sind und fast das Niveau der engsten Zuwächse überhaupt erreichen. Aus der Aufeinanderfolge breiter bzw. schmaler Jahrringe und der Häufung in einzelnen Jahrhunderten resultieren jedoch die vorgestellten säkularen Trends.

Das Very-Low-Frequency Signal wird nach der Prüfung der klimatischen Sensitivität (vgl. Kap. 5, Kap. 6.1, 6.2, 6.3) mit dem diskutierten Low-Frequency Signal zusammengeführt (vgl. Kap. 6.4). Der Vergleich mit anderen Resultaten wird in Kapitel 7 erbracht. Begriffe wie das „Mittelalterliches Optimum“ oder „Kleine Eiszeit“ drängen sich geradezu auf (z.B. FLOHN 1988). Eines wird allerdings hier bereits deutlich: Die Zeitscheibe seit AD 1800 oder 1850, die in zahlreichen Publikationen zur Global Change Debatte diskutiert wird, würde im vorliegenden Fall zu Fehlinterpretationen verleiten. Große Zeitfenster sind bei weitem nicht das einzige Kriterium, jedoch ein wesentliches.

## 5 EXTREMJAHRANALYSE

Der Zusammenhang zwischen langjährigen, alterstrendkorrigierten Jahrringchronologien und Witterungsabläufen wurde und wird meist mit kontinuierlichen Zeitreihenanalysen quantifiziert, von denen die Ermittlung sogenannter "response functions" (FRITTS 1976) die gebräuchlichste ist. Sie stellt über Eigenvektorrechnungen einen linearen Zusammenhang zwischen indextierten Chronologien und der Temperatur bzw. dem Niederschlag her. In einer Abfolge von Jahrringbreiten können jedoch nie alle Anteile der Varianz ausschließlich durch die Ausprägung eines Klimaelements erklärt werden. Vielmehr sind auch an Grenzstandorten immer mehrere Faktoren verantwortlich für die Breite eines Jahrrings (SCHWEINGRUBER et al. 1991b). In der Realität bilden Bäume nur in Jahren mit deutlich begrenzenden oder fördernden Witterungsbedingungen auffallend schmale oder breite Jahrringe, die zwischen einer größeren Anzahl von Individuen parallelisierbar sind, also synchron verlaufen. Entscheidend ist die Anzahl der Standorte und der Bäume je Standort, die gleichartig auf eine klimatische Konstellation reagieren. Diese Betrachtungsweise erklärt, warum der rechnerische Vergleich von kontinuierlichen Jahrringsequenzen mit kontinuierlich aufgezeichneten Klimaelementausprägungen systematische Fehler transportiert. Die Unterstellung eines linearen Zusammenhangs zwischen Jahrringsequenzen und meteorologischen Reihen ist besonders problematisch, wenn innerhalb der Baumpopulationen gegenläufige, sich widersprechende Breitenschwankungen einbezogen sind. Diese Jahre können nicht klimatisch determiniert sein. Einzelne Jahrringe einer Sequenz, deren Breite nicht primär auf Temperatur oder Niederschlag zurückzuführen sind, reduzieren die Aussagekraft kontinuierlicher Zeitreihenanalysen.

Wenn also (i) die Jahrringbreitenchronologien in einzelnen Jahren aus heterogenen Einzelkurven zusammengesetzt sind und außerdem (ii) die zur Verfügung stehenden langjährigen meteorologischen Meßreihen nur unzureichend die klimatischen Bedingungen in den beprobten Beständen widerspiegeln, ist eine Kalibration schwierig (TESSIER 1989). (i) ist im vorliegenden Datensatz *nicht* gegeben. Die Homogenität der Einzelbäume, die an einem Standort zur Chronologie beitragen, wurde in extenso für die interannuellen aber auch die niederfrequenten Variationen verifiziert. Die beprobten Bäume reagieren außergewöhnlich synchron und die Untersuchungsflächen verhalten sich tatsächlich so, wie es von Grenzstandorten zu erwarten ist. Von entscheidender Bedeutung ist jedoch (ii) die mangelhafte Repräsentativität der gemessenen Klimaelemente. Auch wenn zahlreiche Jahre innerhalb einer Sequenz von Ringbreiten klimatisch gesteuert und deshalb homogen sind, ist eine Reduktion der Aussagekraft von kontinuierlichen Zeitreihenanalysen

wahrscheinlich, ja unvermeidbar. Diese methodische Problematik, daß Baum- und Stationsstandorte unterschiedlich sind (vgl. Kap 1.2: klimatisch-ökologische Gradienten), führt gemeinsam mit der Tatsache, daß in ganzen Sequenzen von Ringbreiten auch Jahre mit reduziertem klimatischen Informationsgehalt enthalten sind, zur Extremjahranalyse. Sie evaluiert die extremsten Signale in den Lebensläufen der Bäume und versucht ausschließlich, die wirklich auffälligen Zuwächse zu erklären. Die Resultate der klimatischen Begründung von extrem schmalen und breiten Jahrringen dienen als Erklärungsgrundlage für die kontinuierlichen Vergleiche zwischen 'Proxi- und Meteodaten', die im Anschluß in Kapitel 6 angestrebt werden.

Was aber sind "wirklich auffällige Zuwächse"? In Kapitel 2.3 (Weiserwerte) ist die Methodik beschrieben, wie aus Jahrringbreitenserien Extremjahre evaluiert werden. Zunächst werden von jedem Baum die jährlichen Ereigniswerte und in einem zweiten Schritt daraus die mittleren Extremwerte an einem Standort (= Weiserwerte) berechnet. Besonders negative und positive Ereigniswerte bei einem Baum sind "Ereignisjahre", entsprechende Werte, die sich an einem Standort durchsetzen, werden als "Weiserjahre" bezeichnet (KAENNEL et al. 1995). Die in Kapitel 2.3 beschriebene Methode nach CROPPER (1979) quantifiziert also zunächst das "Ausreißerverhalten" einzelner Jahre bei einzelnen Bäumen ( $C_i$ ).  $C_i$  kann in vielen Jahren einer Sequenz Werte von +1.000 über- und -1.000 unterschreiten. In einzelnen Jahren, so z.B. AD 1917, das an zahlreichen Standorten Kirgistans ein Missing Ring ist, sind maximale Ausschläge bis -10.000 möglich. Werden aus den individuellen  $C_i$ -Reihen Standortmittel berechnet ( $C_m$ ), liegen die resultierenden Weiserwerte bis auf wenige Ausnahmen zwischen +1.000 und -1.000. Bei regionalen Weiserwerten, also dem Mittel aus allen Standorten einer Untersuchungsregion (NW-Karakorum oder Tien Shan), sinkt die Amplitude weiter. Regionale Weiserjahre betonen das gemeinsame Extrem an allen Standorten, gegenständige Weiserjahre der Standorte heben sich auf.

Nachdem die rechnerische Evaluierung auffälliger Zuwächse geklärt ist, stellt sich die Frage, welche Jahre aus einer Sequenz an Weiserwerten die "wahren Extremjahre" oder Weiserjahre sind. Für die Ermittlung stehen verschiedene Verfahren bereit. Beispielsweise können Schranken aus Standardabweichungen gerechnet werden, oberhalb oder unterhalb derer ein Weiserwert als Extremjahr bezeichnet wird und in die Auswertung einfließt. Grundsätzlich ist die Wahl jeder Methode zur Ausweisung von Weiserjahren erlaubt, die am Ende zu den "wahren Extremjahren" führt. Ein einfacher und durchaus praktikabler Ansatz ist, eine definierte Anzahl von Extremjahren (z.B. zehn) pro Jahrhundert zu berücksichtigen. Man geht davon aus, daß die zehn höchsten positiven Weiserwerte und die entsprechenden negativen die relevanten Extremjahre eines Jahrhunderts sind. Dieser Ansatz ist kompli-

zierten Rechenverfahren vorzuziehen, in denen mit verschiedenen statistischen Tools Weiserjahre abgeleitet und metrische Differenzierungen vorge-tauscht werden. Denn schließlich werden meist doch die höchsten und niedrigsten Werte weiterverfolgt.<sup>33</sup> Auch sollte davon abgesehen werden, minimale Unterschiede zwischen einzelnen Weiserjahren zu diskutieren. Beispielsweise ergibt es wenig Sinn, vom sechststärksten Weiserjahr in einem Jahrhundert mehr Erklärungspotential zu erwarten als vom siebtstärksten.

Kapitel 5.1 bespricht zunächst die intensivsten Weiserjahre in den Untersuchungsregionen. Intensiv heißt, daß zahlreiche oder alle Standorte im NW-Karakorum oder dem Tien Shan in einem Jahr gleichartig reagiert haben und gemeinsam ein regionales Weiserjahr bilden. Kapitel 5.2 versucht dann, pakistanische Weiserjahre seit AD 1876, dem Jahr, ab dem meteorologische Daten zur Verfügung stehen, zu erklären.

## 5.1 Regionale Weiserjahre in Pakistan und Kirgistan

Einen Überblick über die Extremreaktionen in den Untersuchungsregionen und die konzeptionelle Vorgehensweise bietet Anhang II. Als Histogramme sind die aufsummierten Weiserwerte der Standorte in Pakistan und Kirgistan im 19. und 20. Jh. dargestellt. Das Prinzip ist recht einfach. Zunächst werden die mittleren Weiserwerte der Standorte durch die Anzahl an Standorten in einer Untersuchungsregion (Pakistan = 16, Kirgistan = 7) dividiert. Die resultierenden Werte sind aufsummiert illustriert.<sup>34</sup> Somit hat jeder Standort, unabhängig davon, wieviele Bäume an ihm beprobt wurden, das gleiche Gewicht auf eine Säule. Die Amplituden der Histogramme reichen von +1.000 bis -1.000. Es entsteht ein Inventar, das über zwei Jahrhunderte angibt, wann die Standorte im NW-Karakorum bzw. im Tien Shan gleich- oder gegenläufig wuchsen. Die jeweils zehn stärksten positiven und negativen Ausschläge in einem Jahrhundert sind mit Jahreszahlen beschriftet.

Die intensivsten Weiserjahre der Länder, sogenannte regionale Weiserjahre, sind Extremjahre, die an einer Mehrzahl, teilweise sogar an allen Standor-

---

<sup>33</sup> Eine potentielle Problematik, die diesen einfachen Ansatz stören könnte, ist die Möglichkeit, daß in verschiedenen Jahrhunderten tatsächlich unterschiedlich viele Extreme aufgetreten sind. Beispielsweise wäre es möglich, daß im 19. Jh. aufgrund geänderter klimatischer Rahmenbedingungen mehr Wachstumsreduktionen vorkommen als im 20. Jh. Diese Einschränkung gilt allerdings nicht für den vorliegenden Datensatz und kann wohl in der Empirie allgemein nur schwer nachgewiesen werden.

<sup>34</sup> In Kirgistan (Anhang II, unten) sind im 19. Jh. nur noch fünf Standorte vertreten, da die Bäume von ART und KAN zu jung sind und für diesen Zeitraum keine ausreichend belegten Ergebnisse liefern.

ten einer Untersuchungsregion zeitgleich auftreten. Anhang II zeigt, daß von den 16 Standorten in Pakistan und 7 in Kirgistan häufig gleichartige Reaktionen ausgehen. Diese regionalen Weiserjahre beruhen an der Waldkante auf 232 Bäumen in Pakistan und 173 in Kirgistan. Offensichtlich gibt es klimatische Konstellationen, die standortübergreifend zu synchronen Extremreaktionen führen. Die zehn stärksten positiven und negativen regionalen Weiserjahre eines Jahrhunderts sind in der jeweils anderen Untersuchungsregion (NW-Karakorum bzw. Tien Shan) mit einem schwarzen Pfeil markiert, wenn die Bäume von dort vergleichbar reagiert haben. Bei in beiden Räumen dekungsgleichen regionalen Weiserjahren sind die Jahreszahlen schwarz umrandet. Danach sind seit AD 1800 fünf positive Weiserjahre in Pakistan und Kirgistan zeitgleich ausgebildet (AD 1804, 1832, 1878, 1910 und 1916). Bei den negativen Extremjahren ist die Ähnlichkeit größer. Hier sind zehn regionale Weiserjahre parallel (AD 1802, 1806, 1810, 1833, 1858, 1871, 1877, 1911, 1917 und 1936).

	Extremste Jahre (AD 1427-1993) <i>Pakistan</i>	Position & Wert der Jahre in <i>Kirgistan</i>	Extremste Jahre (AD 1427-1993) <i>Kirgistan</i>	Position & Wert der Jahre in <i>Pakistan</i>	Extremste Jahre (AD 932-1426) <i>Pakistan</i>
positive Weiser- jahre	1577 (1. 1103)	18. (841)	1460 (1. 1370)	85. (488)	948 (1884)
	1531 (2. 1074)	51. (615)	1529 (2. 1365)	64. (-581)	1075 (1400)
	1606 (3. 1069)	93. (406)	1919 (3. 1257)	251. (93)	1211 (1342)
	1475 (4. 994)	64. (-547)	1481 (4. 1257)	105. (-400)	1062 (1206)
	1772 (5. 993)	212. (152)	1514 (5. 1254)	29. (714)	1166 (1177)
	1832 (6. 987)	69. (488)	1517 (6. 1219)	78. (507)	1029 (1150)
	1594 (7. 982)	96. (400)	1916 (7. 1218)	24. (755)	1121 (1119)
	1590 (8. 980)	78. (463)	1640 (8. 1102)	127. (350)	932 (1117)
	1807 (9. 955)	154. (-252)	1484 (9. 1084)	87. (479)	1100 (1114)
	1747 (10. 921)	137. (310)	1703 (10. 1067)	13. (854)	1155 (1105)
negative Weiser- jahre	1742 (1. -1327)	12. (-1088)	1917 (1. -2794)	22. (-944)	1026 (-1765)
	1726 (2. -1224)	83. (-444)	1513 (2. -1673)	60. (-579)	1159 (-1512)
	1492 (3. -1204)	5. (-1419)	1802 (3. -1601)	20. (-954)	1150 (-1410)
	1663 (4. -1187)	197. (-140)	1483 (4. -1508)	18. (-994)	1120 (-1402)
	1611 (5. -1180)	41. (-657)	1492 (5. -1419)	3. (-1204)	1212 (-1389)
	1871 (6. -1171)	7. (-1289)	1775 (6. -1333)	59. (-579)	1088 (-1289)
	1865 (7. -1164)	108. (-371)	1871 (7. -1289)	6. (-1171)	1310 (-1283)
	1608 (8. -1150)	270. (+49)	1624 (8. -1275)	195. (-160)	1180 (-1262)
	1466 (9. -1124)	68. (-523)	1806 (9. -1222)	44. (-706)	1171 (-1258)
	1895 (10. -1116)	226. (-96)	1591 (10. -1182)	25. (-908)	1101 (-1251)

Tab. 8: Regionale Weiserjahre (WJ) in Pakistan seit AD 932 und Kirgistan seit AD 1427 (Fett = WJ in beiden Regionen, Kursiv = gegenständige WJ, in Klammern = Rang und Wert eines WJ)

Tabelle 8 greift die überregionalen Vergleiche in variierender Form auf. In den Spalten eins und drei sind jeweils die zehn extremsten positiven und negativen Weiserjahre der Länder seit AD 1427 sowie in Klammern der entsprechende Rang und Wert dargestellt. In den Spalten zwei und vier sind die Ränge und in Klammern Werte der anderen Untersuchungsregion aufgelistet. Fett eingetragen sind Jahreszahlen, Ränge und Werte, wenn ein Extremjahr in den "Vergleichsländern" (Spalte zwei und vier) zu den 50 stärksten regionalen Weiserjahren zählt. Wird im Vergleichsland allerdings eine gegenläufige Reaktion rekonstruiert, also eine negative in Kirgistan in einem der zehn positivsten in Pakistan, ist der Rang kursiv geschrieben. Schließlich sind in der letzten Spalte die stärksten pakistanischen Weiserjahre von AD 932 bis 1427 notiert. Von diesem Zeitraum fehlen die entsprechenden Werte in Kirgistan. Das Kriterium für die Zeitspannen ist, daß mindestens drei Standorte je Region in die Berechnung einfließen. Der drittälteste Standort in Kirgistan reicht somit bis AD 1427.

An einem Beispiel wird deutlich, wie die Tabelle zu lesen ist: AD 1577 (Spalte eins, Ziffer eins) war das positivste Weiserjahr aus allen 16 Standorten in Pakistan seit AD 1427. Der nach CROPPER (1979) ermittelte Wert des regionalen Weiserjahres ( $C_m$ ) ist +1.103, die Position die eins. Gleichzeitig bilden die Standorte in Kirgistan im Mittel ein positives regionales Weiserjahr der Stärke +841. Da es zu den 50 intensivsten Weiserjahren seit AD 1427 zählt (Position 18), sind die entsprechenden Eintragungen fett markiert. Fette Signaturen weisen demnach auf deckungsgleiche regionale Weiserjahre hin, ein Kriterium, das bei den zehn positivsten Jahren in Pakistan kein weiteres Mal erfüllt wird. AD 1577 konnte sich nur durchsetzen, weil zahlreiche pakistanische Standorte vergleichbar "extrem" regiert haben. Von vielen wird also ein außergewöhnlich breiter Jahrring rekonstruiert, der sich von den umgebenden deutlich abhebt. Der Begriff des "regionalen Weiserjahres" scheint in diesem Fall berechtigt, unterscheiden sich die Standorte doch in der Höhe über NN und Exposition. In Pakistan sind außerdem die horizontalen klimatisch-ökologischen Gradienten zu berücksichtigen (vgl. Kap. 1.2). Bei Deckungsgleichheit zwischen den beiden Untersuchungsregionen sind es "überregionale Weiserjahre".

Ein Vergleich der regionalen Weiserjahre seit AD 1427 zeigt, daß die negativen Extreme stärker sind als die positiven. Dies geht aus den in Klammern notierten Weiserwerten hervor. Aufgrund der unterschiedlichen Anzahl an Standorten, die zu den regionalen Weiserjahren beigetragen haben (Pakistan = 16, Kirgistan = 7), können die Stärken jedoch nur innerhalb der Länder verglichen werden. Danach ist in Pakistan das zehntstärkste negative Weiserjahr (AD 1895 = -1116) immer noch intensiver als das stärkste positive (AD 1577 = +1.103). Berechnet man von den in Tabelle 8 dargestellten zehn

stärksten Jahren die mittleren Ausprägungen (Pakistan: pos. WJ = 1.006, neg. WJ = -1.185; Kirgistan: pos. WJ = 1.219, neg. WJ = -1.530), werden die Unterschiede noch deutlicher. Obwohl die Extreme aus einer Zeitspanne von mehr als 500 Jahren im Mittel alle über +1.000 bzw. unter -1.000 liegen, heben sich die negativen auf diesem Niveau noch mal signifikant ab. Offensichtlich sind die negativen Weiserjahre (i) innerhalb der Standorte und (ii) zwischen den Standorten einer Region synchroner als die positiven. Es ist die gleichläufige Reaktion, die nach der doppelten Mittelwertberechnung (Standort und Region) ein starkes Weiserjahr verursacht. Danach ist von den negativen Weiserjahren ein erhöhtes Erklärungspotential für klimatische Konstellationen zu erwarten.

Vor diesem Hintergrund ist es nicht verwunderlich, daß die negativen Extreme zwischen den beiden Untersuchungsregionen häufiger übereinstimmen. Die Anzahl der fetten Einträge überwiegt in der unteren Tabellenhälfte eindeutig. Positive Extremjahre werden seltener im jeweiligen Vergleichsland bestätigt. Mittelwerte bei den positiven und negativen Weiserwerten in den Spalten zwei und vier (Kirgistan: pos. WJ = 288, neg. WJ = -598; Pakistan: pos. WJ = 326, neg. WJ = -820) zeigen die größere Übereinstimmung bei den auffallend schmalen Jahrringen. Der mittlere Wert von -820 bei den pakistanischen Vergleichsjahren resultiert nicht zuletzt aus den sieben fetten Einträgen (Spalte vier, unten). Das bedeutet, daß sieben der 50 stärksten regionalen Weiserjahre Pakistans zu den zehn stärksten Kirgistans zählen! Anders ausgedrückt, ist im NW-Karakorum mit einiger Wahrscheinlichkeit mit einem auffallend schmalen Jahrring zu rechnen, wenn an vielen Standorten des Tien Shan ein extrem schmaler wächst.

Unabhängig von Tabelle 8 können auch die jeweils 50 extremsten Jahre aus Pakistan und Kirgistan in Beziehung gesetzt werden. Danach kommen lediglich 8 positive regionale Weiserjahre in beiden Ländern vor: AD 1431, 1514, 1555, 1577, 1703, 1766, 1804 und 1916. Von den negativen regionalen Weiserjahren sind immerhin 17 deckungsgleich: AD 1483, 1492, 1495, 1572, 1591, 1605, 1611, 1653, 1669, 1742, 1790, 1802, 1806, 1833, 1871, 1877 und 1917. Negative Weiserjahre haben demnach eine größere überregionale Bedeutung als positive. Sie sind synchroner bzw. stärker und ihr klimatischer Informationsgehalt ist größer.

Neben den homogenen Extremjahren zwischen den Standorten einer Untersuchungsregion bzw. zwischen den Regionen geht aus Anhang II hervor, daß einzelne Standorte dann extrem reagieren, wenn an allen anderen Untersuchungsflächen keine auffälligen Zuwächse zu verzeichnen sind. Beispielsweise reagiert je ein Standort in den Jahren AD 1841 und 1847 signifikant positiv. Die auffallenden Zuwächse sind als vergleichsweise große (wei-

ße) Säulenteile in Anhang II zu erkennen. Da aber die anderen Standorte keine vergleichbaren Reaktionen zeigen, entsteht auch kein regionales Weiserjahr. Derartig singuläre Standortweiserjahre treten häufiger auf, und eine detaillierte Dokumentation aller Muster ist sicher nicht möglich.

positive WJ	Anz. Standorte mit pos/leicht pos/neg Reaktion	negative WJ	Anz. Standorte mit neg/leicht neg/pos Reaktion
1981	6/7/1	1971	11/1/2
1969	9/5/0	1968	6/8/0
1959	7/7/0	1950	10/2/2
1945	9/5/0	1946	9/5/0
1942	9/5/0	1944	8/5/1
1935	6/8/0	1936	7/5/2
1921	10/2/2	1918	9/4/1
1916	12/0/2	1917	10/4/0
1910	6/8/0	1911	6/4/4
1908	6/7/1	1909	7/7/0
1894	8/6/0	1895	13/1/0
1878	5/8/1	1877	12/2/0

Tab. 9: Zusammensetzung von 12 positiven und negativer Weiserjahren (WJ) in Pakistan seit AD 1876

Tabelle 9 entschlüsselt die Standortzusammensetzung der regionalen Weiserjahre seit AD 1876 in Pakistan. Dargestellt sind in den Spalten zwei und vier die Anzahl der Standorte, die positiv, leicht positiv oder negativ in insgesamt positiven regionalen Weiserjahren bzw. negativ, leicht negativ oder positiv in insgesamt negativen regionalen Weiserjahren reagieren. Die regionalen Weiserjahre entsprechen den aufsummierten Säulen aus Anhang II.<sup>35</sup> Insgesamt wird bestätigt, daß die regionalen Weiserjahre

in Pakistan aus homogenen Ausreißern an fast allen Standorten resultieren. Allerdings reagieren in verschiedenen Jahren einzelne Standorte gegenläufig zum regionalen Trend. So zeigen beispielsweise AD 1916 zwölf Flächen einen positiven Ausreißer, zwei Plots bildeten im Mittel aber einen eher schmalen Jahrring. AD 1911 reagieren sogar vier Standorte gegenläufig. Die insgesamt stärksten Weiserjahre des untersuchten Zeitraums sind AD 1945 (positiv) und AD 1895 (negativ). In ihnen sind die Aussagen über alle Untersuchungsflächen homogen. Hier drängt sich geradezu die Frage auf, welche meteorologischen Konstellationen derart gleichläufige Extreme entlang der Transekte und in verschiedenen Expositionen auslösen. Interessant ist aber auch, ob von den abweichenden Reaktionen an einzelnen Standorten systematische Informationen abgeleitet werden können.

<sup>35</sup> Im Gegensatz zu Anhang II, wo alle 16 pakistanischen Standorte einfließen, fehlen hier aufgrund der geringen Belegungsdichten die Untersuchungsflächen HUN und Bag3. Die Einteilung in starke und schwache Reaktionen orientiert sich an den Standardabweichungen der Weiserwerte an den einzelnen Standorten.

## 5.2 Klimatische Erklärung von Extremjahren in Pakistan AD 1876-1990

Über die mangelhafte Repräsentativität der Klimadaten wurde bereits an verschiedenen Stellen berichtet (z.B. Kap. 3.2). Unabhängig von möglichen Meßfehlern und einer Zunahme der Unschärfe in älteren Jahrgängen müssen zweifelhafte Resultate, wenn sie vorkommen, zunächst auf diesen Sachverhalt zurückgeführt werden. Erst in zweiter Linie können die Proxidata selbst verantwortlich gemacht werden, denn die Homogenität innerhalb und zu großen Teilen auch zwischen den Standorten beweist zweifelsfrei die klimatische Steuerung der Jahrringbreiten. Dies trifft insbesondere in rekonstruierten Extremjahren zu.

Figur 23 zeigt die Wachstumsreaktionen pakistanischer Standorte in einer Auswahl von regionalen Weiserjahren seit AD 1876 im Vergleich zu den Jahrgängen der Temperatur und des Niederschlags. Untersucht werden vier negative (AD 1917, 1950, 1895 und 1877) und nur zwei positive regionale Weiserjahre (AD 1921 und AD 1942), da die negativen Extreme homogener sind und von ihnen ein erhöhtes Erklärungspotential ausgeht (Kap. 5.1). In der Figur links sind die Jahrgänge der Klimatelemente Temperatur und Niederschlag vom Oktober des Vorjahres bis zum September des aktuellen Jahres eingetragen.<sup>36</sup> Graue Flächen illustrieren die monatlichen Temperaturvariationen vom langjährigen Mittel (AD 1876 bis 1990), schwarze Säulen die monatlichen Niederschlagabweichungen.<sup>37</sup>

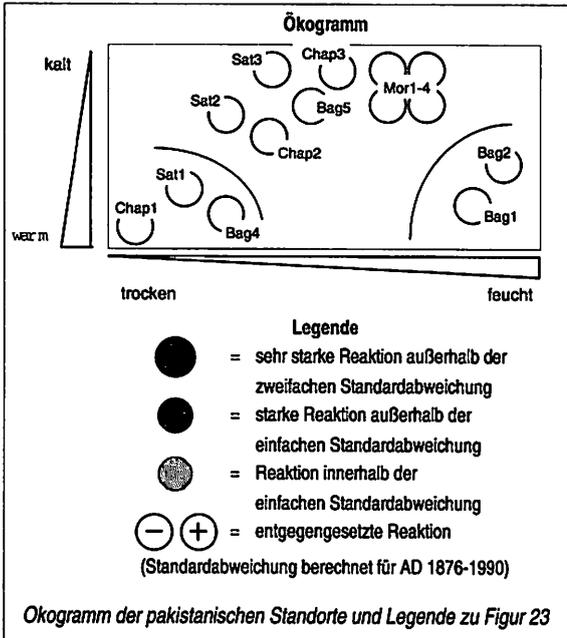
Die Legende zu Figur 23 erklärt die Signaturen in der rechten Hälfte der Abbildung. Das Ökogramm ordnet die einzelnen Standorte entlang eines Temperatur- und Niederschlaggradienten relativ zueinander an.<sup>38</sup> Von den

---

<sup>36</sup> Eine detaillierte Analyse ergab, daß weiter zuvor liegende Temperatur- und Niederschlagvariationen (z.B. zwei Jahre zuvor) nicht sinnvoll in Einklang mit dem Baumwachstum gebracht werden können. Entweder liegt keine Beeinflussung über derart lange Zeiträume vor oder die reduzierte Wirksamkeit auf die kambiale Aktivität geht durch die mangelhafte Repräsentativität der meteorologischen Reihen vollends verloren. Deshalb beginnen die Klimadiagramme im Oktober des Vorjahres.

<sup>37</sup> Datengrundlage für die Klimadiagramme ist die in Kapitel 3.2 präsentierte Mittelkurve Mean6 aus verschiedenen meteorologischen Meßstationen. Mean6 spiegelt das regionale Klima wider und ist die einzige Möglichkeit, einigermaßen repräsentative Werte für den NW-Karakorum zu erhalten. Kalibrationsversuche mit Einzelstationen ergaben keine sinnvollen Ergebnisse.

<sup>38</sup> Die Lage der Standorte im Ökogramm resultiert aus den klimatisch-ökologischen Gradienten, die eingehend in Kapitel 1.2 beschrieben sind. Es ist Ausdruck der Beprobungsstrategie, deren Ziel die Maximierung der Unterschiede zwischen den Standorten des NW-Karakorums war. Beispielsweise sind die trockenen Tieflagenstandorte links unten eingezeichnet. Aufgrund der geringen Belegung fehlen die Standorte Bag3 und HUN.



feucht-kalten Standorten wie Mor1-4, Chap3 oder Bag5 wird eher eine Limitierung durch die Temperatur erwartet, von den trocken-warmen wie Chap1, Sat1 und Bag4 eher durch den Niederschlag. Die Kreissignaturen geben die Wachstumsreaktionen an den Standorten wider. Dunkle Schraffuren zeigen eine sehr starke gleichläufige Reaktion an, also eine negative Standortreaktion in einem negativen regionalen Weiserjahr (horizontale Schraffur) und umgekehrt (vertikale

Schraffur). Dunkelgraue Flächen stehen für starke Reaktionen, hellgraue für schwache. Minus und Plus kennzeichnen Standorte, die in positiven Weiserjahren negativ reagiert haben und umgekehrt. Somit ermöglicht die Darstellungsform einerseits die klimatische Erklärung eines regionalen Weiserjahres und andererseits die Beobachtung der Reaktion an den einzelnen Standorten in Abhängigkeit von der Stellung im Ökogramm.

AD 1917 ist im NW-Karakorum eines der stärksten negativen Weiserjahre des 20. Jh.s. An allen Standorten wuchs ein schmaler Jahrring, der sich von den umgebenden deutlich abhebt. Verursacht wurde die Reaktion der Bäume durch ein Temperaturdefizit, das insbesondere zu Beginn der Vegetationsperiode extrem war. Die kambiante Aktivität wurde eingeschränkt, obwohl gleichzeitig ausreichend Niederschläge fielen. Im Mittel aus sechs Klimastationen (vgl. Kap. 3.2: Mean6) war AD 1917 eines der kältesten Jahre seit AD 1876, und die Reaktion der Bäume an der oberen Waldgrenze (im Ökogramm oben) ist nicht verwunderlich. Bei näherer Betrachtung fällt jedoch auf, daß die Tieflagenstandorte (im Ökogramm links unten) und die N-exponierten Mischbestände mit *Picea smithiana* und *Pinus wallichiana* des Bagrot Tals (rechts unten) stärker betroffen sind. Diese starke Limitierung der Standorte an der niederschlagbedingten unteren Waldgrenze ist ungewöhnlich. Nach der Theorie (z.B. LA MARCHE 1974) sollte sie im Vergleich zur oberen Waldgrenze

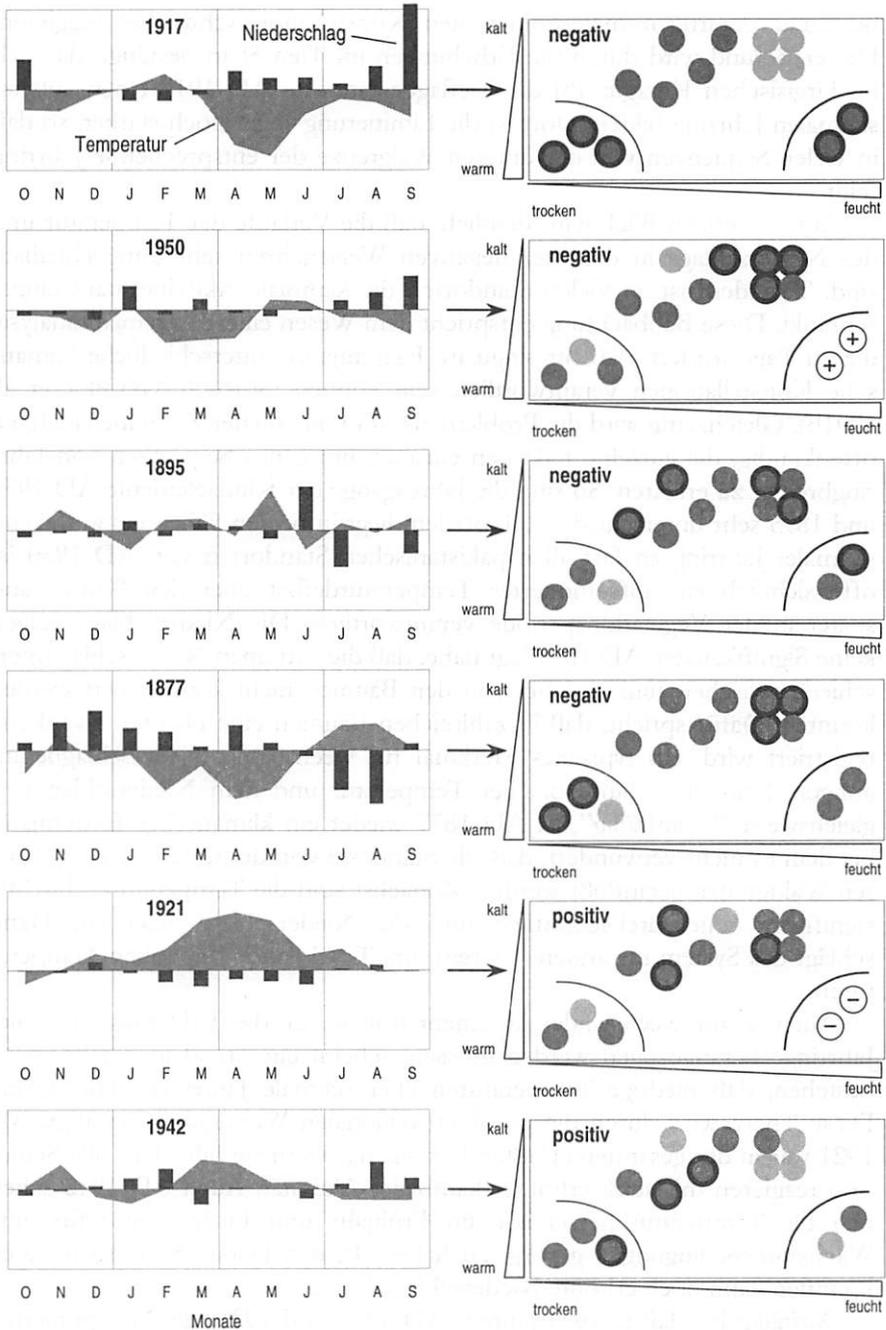


Fig.23: Temperatur- und Niederschlagjahrgang in ausgewählten WJ und Standortreaktionen

bei einer derartigen meteorologischen Konstellation schwächer reagieren. Dieser Befund wird durch die Erhebungen im Tien Shan bestätigt, da auch im kirgisischen Karagai Tal die Tieflagenstandorte AD 1917 einen äußerst schmalen Jahrring bilden. Dort ist die Limitierung sogar noch stärker, so daß in vielen Sequenzen von der unteren Walgrenze der entsprechende Jahrring fehlt.

Auf den ersten Blick wird deutlich, daß die Verläufe der Temperatur und des Niederschlags in den vier negativen Weiserjahren sehr unterschiedlich sind. Trotzdem ist an vielen Standorten die kambiiale Aktivität stark eingeschränkt. Diese Beobachtung entspricht dem Wesen einer Extremjahanalyse, die zu Tage fördert, daß für singuläre Extremjahre unterschiedliche klimatische Konstellationen verantwortlich sein können (SCHWEINGRUBER et al. 1991b). Gleichzeitig wird die Problematik kontinuierlicher Zeitreihenanalysen offenkundig, die einzelne Faktoren einsetzt, um ganze Sequenzen von Jahrringbreiten zu erklären. So sind die Jahresgänge der Klimaelemente AD 1950 und 1895 sehr unterschiedlich. Trotzdem liegt in beiden Fällen ein auffallend schmaler Jahrring an fast allen pakistanischen Standorten vor. AD 1950 ist offensichtlich ein aufsummiertes Temperaturdefizit über den Winter und später in der Vegetationsperiode verantwortlich. Die Niederschläge zeigen keine Signifikanzen. AD 1895 legt nahe, daß die extremen Niederschlagsunterschiede zwischen Juni und Juli von den Bäumen nicht kompensiert werden konnten. Dafür spricht, daß in zahlreichen Bäumen eine Dichteschwankung registriert wird, ein typisches Merkmal für wechselnde Niederschlagbedingungen. Sind diese Jahre bei der Temperatur und dem Niederschlag vergleichsweise "unauffällig", ist AD 1877 wieder ein klimatisches Extremjahr, bei dem es nicht verwundert, daß alle Standorte von der unteren bis zur oberen Waldgrenze beeinflusst werden. Zunächst sind die Temperaturen bis Mai signifikant unterdurchschnittlich und die Niederschläge reichlich. Dann schlägt das System ins andere Extrem um: Trockenheit bei hohen Temperaturen.

Auch wenn wechselnde Argumentationen für die Erklärung schmaler Jahrringe herangezogen werden müssen, scheint ein Trend in der Form zu bestehen, daß niedrige Temperaturen eher schmale Jahrringe verursachen. Diese These wird durch die positiven regionalen Weiserjahre bestätigt. AD 1921 war in der gesamten erfaßten Periode das wärmste Jahr. Fast alle Standorte reagieren mit stark erhöhter kambialer Aktivität. Auch AD 1942 scheinen die Temperaturüberschüsse im Frühjahr und Frühsommer für gute Wachstumsbedingungen gesorgt zu haben. In den heißen Sommermonaten kommen dann noch erhöhte Niederschläge hinzu.

Auffällig ist, daß in zwei Jahren (AD 1950 und 1921) die N-exponierten Mischbestände (im Ökogramm rechts unten) gegenläufig zum allgemeinen

Trend reagieren. Die Sonderstellung dieser Standorte wird durch die Analyse zahlreicher weiterer Weiserjahre bestätigt. Teilweise systematisch wird das homogene Bild der reinen Wacholderbestände, das in regionalen Weiserjahren von der unteren bis zu oberen Waldgrenze Gültigkeit hat, durchbrochen. Interessanterweise weichen die N-exponierten Standorte des Bagrot Tals meist dann vom kollektiven Trend ab, wenn signifikante Niederschlagüberschüsse oder -defizite (mit umgekehrten Temperaturbedingungen) auftreten. Ein gutes Beispiel ist AD 1921, da die Temperaturen auffallend hoch waren, gleichzeitig aber über einen längeren Zeitraum wenig Niederschläge fielen. Dieser Befund widerspricht massiv der Erwartungshaltung und auch den Ergebnissen, die aus der Literatur hervorgehen (z.B. LA MARCHE 1974, SCHWEINGRUBER 1996). Demnach wird von den N-exponierten Standorten des feuchten Bagrot Tals eher eine Limitierung durch die Temperatur erwartet.

Insgesamt verhalten sich die pakistanischen Standorte in regionalen Weiserjahren äußerst homogen. Auch auf der vergleichsweise schlechten Datenbasis der Monatsmittelwerte gelingt es, Extremjahre des Baumwachstums zu erklären. Dabei zeichnet sich eine größere Beeinflussung durch die Temperatur im Vergleich zum Niederschlag ab, wobei in verschiedenen Einzelfällen allerdings auch dieses Klimatelement maßgeblich für das Jahringwachstum ist. In extremen Jahren der Temperatur und des Niederschlags (z.B. AD 1917 und 1921) sind die Zuwachseinbrüche und -zunahmen eindeutig erklärbar. Jedoch können ebenso vergleichsweise ausgeglichene Jahresgänge der Klimatelemente signifikante Baumreaktionen auslösen, was möglicherweise auf die mangelhafte Repräsentativität der meteorologischen Daten zurückzuführen ist. Die standortübergreifenden Wachstumsmuster müssen zumindest teilweise durch unterschiedliche meteorologische Konstellationen begründet werden.

Da von den regionalen Weiserjahren nur wenig Erklärungspotential in bezug auf eine Standortdifferenzierung ausgeht – die Reaktion aller Standorte ist ja maßgebend für ein regionales Weiserjahr – sind in Tabelle 10 die extremsten Standortweiserjahre (AD 1876 bis 1990) zusammengestellt, die *keine* regionalen Weiserjahre sind (Spalte eins). Jeder Standort hat eine positive und eine negative Nennung (Spalten zwei und drei), wobei in Klammern der jeweilige Rang des Standortweiserjahres beigefügt ist. Aus Zeile eins geht beispielsweise hervor, daß an Mor4, einer SSE-exponierten Untersuchungsfläche in 3900m NN (Spalte vier), das drittstärkste Weiserjahr AD 1988 gewachsen ist. Die zwei stärksten Weiserjahre zählen demnach zu den regionalen Weiserjahren. Gleichzeitig wurde nach diesem System AD 1988 kein weiterer Standort notiert (vgl. z.B. AD 1903). In Spalte fünf sind dann die wesentlichen

Jahre	neg. WJ	pos. WJ	Höhe/Exp.	Variationen T und NS	Diskussion
1988		Mor4 (III)	3900/SSE	Nov-Feb & Apr-Mai sehr warm / Mär feucht	hochgelegener S-Standort reagiert auf T
1986	Mor3 (VI)		3600/ENE	Mär-Sep kalt / NS normal	hochgelegener N-Standort reagiert auf T
1985	Sat1 (III)		3300/NE	Nov-Apr warm / NS normal	<i>nicht erklärbar</i>
1983		Sat1 (I)	3300/NE	Feb-Jul kalt bis sehr kalt / Mär feucht, Apr & Aug sehr feucht	tiefgelegener S-Standort reagiert auf NS
1982	Sat2 (I)		3700/S	Feb-Jul kalt bis sehr kalt / Mär-Mai feucht, Jul & Sep sehr trocken	hochgelegener S-Standort reagiert auf T (So.-trockenheit)
1978		Chap3 (IV)	3900/S	Mär & Jul kalt, Mai sehr warm / Mär & Jun-Jul feucht	<i>nicht erklärbar</i>
1949		Chap2 (III)	3500/S	Apr & Mai sehr warm, Sep warm / Aug sehr trocken	hochgelegener S-Standort reagiert mögl. auf T (Frühjahr)
1947	Bag4 (IV)		3050/S	Feb-Aug sehr warm / Feb-Aug trocken trocken, Sep sehr feucht	tiefgelegener S-Standort reagiert auf NS
1938		Mor2 (II)	3800/ENE	Mär-Apr & Jun-Sep warm, Mai sehr warm / Jun-Sep sehr trocken	hochgelegener N-Standort reagiert auf T
1933	Chap2 (II) Mor2 (I)		3500/S 3800/ENE	Apr-Mai & Aug-Sep sehr kalt / Aug-Sep sehr feucht	hochgelegene Standorte reagieren auf T
1932		Mor1 (I)	3900/SW	Jan-Apr & Jun warm / Jan-Feb & Apr & Jun-Jul trocken	hochgelegener S-Standort reagiert auf T
1931		Bag4 (II) Chap1 (I)	3050/S 2700/S	Feb kalt, Apr & Aug warm / Jan-Apr & Jun-Jul trocken, Aug-Sep	<i>nicht erklärbar</i>
1930	Bag5 (III)		3750/S	Apr & Jun kalt, Jul sehr kalt / Jul feucht, Aug sehr trocken	hochgelegener S-Standort reagiert auf T
1927	Chap1 (II)		2700/S	Jan-Mär kalt / Jan & Mär-Jun trocken, Aug sehr feucht	tiefgelegener N-Standort reagiert mögl. auf NS
1914		Bag1 (IV)	3100/NNW	Feb-Jun kalt / Apr-Jun. feucht, Jul & Sep sehr feucht	tiefgelegener N-Standort reagiert auf NS
1909	Sat3 (III)		3900/S	Dez-Feb & Apr-Sep kalt / Mär & Aug trocken, Jun-Jul sehr feucht	hochgelegener S-Standort reagiert auf T
1904		Mor3 (III)	3600/ENE	Apr-Aug warm / Mär sehr feucht, Apr-Sep trocken	hochgelegener N-Standort reagiert auf T
1903	Bag2 (III) Mor1 (VIII) Mor4 (IV)		3300/NNW 3900/SW 3900/157	Mär-Mai kalt, Jun-Jul warm / Feb trocken, Jun-Jul trocken	<i>nicht erklärbar</i>
1892		Sat2 (III)	3700/S	Jan-Feb warm, Mär-Mai sehr warm, Aug-Sep kalt / Aug-Sep sehr feucht	hochgelegener S-Standort reagiert auf T (Frühj.)/NS (So.)
1885	Chap3 (IV)		3900/S	Feb kalt, Mai außergew. kalt / Jan & Apr & Mai feucht, Jun & Sep	hochgelegener S-Standort reagiert auf Extremmonat Mai
1884	Bag1 (IV)		3100/NNW	Okt-Nov kalt, Jan warm /	tiefgelegener N-Standort reagiert auf NS
		Bag5 (VI)	3750/S	Dez-Jun trocken, Aug-Sep feucht	hochgelegener S-Standort nicht erklärbar
1883		Bag2 (IV)	3300/NNW	Feb kalt, Apr-Aug warm / Jan & Mai & Sep feucht, Aug trocken	tiefgelegener N-Standort reagiert auf T
1880		Sat3 (IV)	3900/S	Jan & Mai-Jun & Aug-Sep warm, Mär- Apr sehr warm / Mär-Apr trocken, Mai- Jul sehr feucht, Aug-Sep trocken	hochgelegener S-Standort reagiert auf T

Tab. 10: Intensivste WJ pakistan. Standorte, die nicht zu regionalen WJ gehören und klimat. Erklärung

Fakten zu den Temperatur- und Niederschlagjahresgängen beschrieben. Schließlich diskutiert Spalte sechs die Resultate aus dem Vergleich der Baumreaktion mit der meteorologischen Konstellation. Es wird unterschieden, ob ein Hochlagen- oder Tieflagenstandort eher durch die Temperatur oder den Niederschlag limitiert wurde.

Danach können von insgesamt 23 Weiserjahren 14 Standortreaktionen eindeutig erklärt werden, d.h., hochgelegene Standorte reagieren auf die Temperatur und tiefgelegene auf den Niederschlag.<sup>39</sup> Von den restlichen neun Jahren sind vier nicht erklärbar. In den Jahren AD 1985, 1978, 1931 und 1903 können die auffallenden Jahrringe nicht auf den Witterungsverlauf zurückgeführt werden. Weitere vier Jahre (AD 1949, 1927, 1892 und 1885) können nicht eindeutig der Ausprägung der Klimaelemente zugeordnet werden. Und schließlich reagiert ein tiefgelegener Standort aus dem N-exponierten Transekt des Bagrot Tales (Bag2) AD 1883 auf die Temperatur.

Beim Studium der Tabelle wird offenkundig, daß für die Kernaussage, 'Hochlage reagiert auf Temperatur und Tieflage auf Niederschlag', vielfach unterschiedliche jahreszeitliche Ausprägungen der Klimaelemente herangezogen werden. So bleiben trotz der klaren Tendenzen, daß Hochlagen im singulären Extrem eher Temperaturjahre sind und Tieflagenstandorte eher Niederschlagjahre, Vorbehalte. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, daß zahlreiche weitere Ansätze zur Erklärung von Extremjahren keine befriedigenden Ergebnisse geliefert haben. Die unzureichende Repräsentativität der Klimastationen für die Baumstandorte im NW-Karakorum ist dafür sicher mitverantwortlich. Für die in Kapitel 6 angestrebten kontinuierlichen Berechnungen scheint deshalb die Erkenntnis wesentlich, daß Monatswerte der Klimaelemente eher zu systematischen Fehlern verleiten. Von generalisierenden Jahresmittelwerten könnte ein größeres Erklärungspotential ausgehen. Zweitens sollte die Erwartungshaltung bei derartigen Rechenmodellen nicht allzu hoch angesiedelt werden, da in einer Sequenz von Jahrringen sogar die Extremereignisse nur mit Abstrichen erklärt werden können. In diesem Kontext wird zu zeigen sein, ob die hochfrequenten interannuellen Variationen, die ja in der Extremjahanalyse zum Ausdruck kommen, die geeignete Wellenlänge sind, oder ob das Low-Frequency Signal möglicherweise besser klimatisch erklärt werden kann.

---

<sup>39</sup> Aufgrund der Fülle an Befunden und weil die wesentlichen Resultate in der Tabelle schriftlich festgehalten sind, erübrigt sich eine detaillierte Diskussion von Einzelfällen.

## 6 KLIMA/WACHSTUMS-BEZIEHUNGEN

Die Idee kontinuierlicher Zeitreihenanalysen (FRITTS 1976), also die Quantifizierung der Klima/Wachstums-Beziehungen mit durchgehenden Sequenzen, ist, aus dem Komplex der Umweltfaktoren, die das Baumwachstum beeinflussen, den prägend limitierenden Faktor zu isolieren. Fokussiert eine Studie die Rekonstruktion von Klimazuständen über den durch meteorologische Messungen erfaßten Zeitraum hinaus, sind zwei Voraussetzungen zwingend. Zunächst müssen tatsächlich in den Jahrringsequenzen klimatische Signale archiviert sein. Dies ist im vorliegenden Datensatz wahrscheinlich, da die Stringenz der klimatischen Steuerung an den Verbreitungsgrenzen zunimmt (Zusammenfassung in SCHWEINGRUBER 1996). Im NW-Karakorum und im Tien Shan kann für die obere Waldgrenze die Hypothese formuliert werden, daß die Temperaturen maßgeblich für das Jahrringwachstum sind. Umgekehrt sollte dieser Zusammenhang an den Standorten nahe der unteren Waldgrenze zumindest schwächer werden. Möglicherweise kommt dort den Niederschlägen eine größere Bedeutung zu (LA MARCHE 1974).

Aus den Prämissen, die an die Beprobungsstrategie geknüpft sind, resultiert die zweite Voraussetzung. Erhöhte klimatische Steuerung bedeutet zwingend hohe Anteile synchronen Wachstums. Diese Forderung wurde ausführlich für den vorliegenden Datensatz verifiziert (Kap. 3.1.2 und Kap. 4.1). Neben den parallelen interannuellen Anteilen, die schließlich in der Extremjahranalyse berücksichtigt wurden, ist insbesondere auf das niederfrequente (Low-Frequency) Signal hingewiesen worden, das innerhalb und zwischen zahlreichen Standorten synchronisiert werden kann. Als limitierender Faktor kommt allein das Klima in Frage, das standortübergreifend und z.T. zwischen den Untersuchungsregionen (Tien Shan und NW-Karakorum) parallele Jahrringvariationen verursacht.

Die Evaluierung der Klima/Wachstums-Beziehungen zielt bewußt auf unterschiedliche Wellenlängen. Meist werden  $\delta d$ -Standortchronologien oder Mittelkurven aus mehreren Standorten verwendet, um durch Korrelation oder Regression den Einfluß des Klimas zu quantifizieren.  $\delta d$ -indexierte Reihen minimieren an den Standorten Pakistans und Kirgistans das Rauschen und betonen die Signale im Sinne von COOK (1992) (vgl. Kap. 4.1). Ungefiltert dominieren in den entsprechenden Chronologien die interannuellen Variationen. Die Kalibration dieser Reihen mit meteorologischen Daten evaluiert also zu großen Anteilen die Klima/Jahrring-Beziehungen von Jahr zu Jahr. Dieses Ziel verfolgt Kapitel 6.1. Wird aber der hochfrequente Anteil durch Filterung (15-jährige ungewichtete gleitende Mittelwerte) unterdrückt, dominieren die niederfrequenten Signale die Berechnung. Kapitel 6.2 zeigt,

welches Klimaelement im wesentlichen die mittelfristigen Wachstumsvariationen in Pakistan verursacht.

Für die Kalibration der pakistanischen Standorte wird die in Kapitel 3.2 präsentierte regionale Klimareihe „Mean6“ verwendet. Da Klimadaten im Vergleich zu Jahrringbreiten weitaus unabhängiger sind, ist die Zusammenfassung von sechs Stationen einfacher. Im Gegensatz zu den *8d*-Chronologien spielen Autokorrelationen von Jahr zu Jahr in Mean6 keine Rolle. Zu bedenken ist jedoch, daß Niederschlagsereignisse i.d.R. mit einer Abnahme der Temperatur einher gehen und Großwetterlagen über Monatsgrenzen hinweg wirksam sind. Deshalb sind benachbarte Monate nicht unabhängig. Auf diese Zusammenhänge wird an gegebener Stelle hingewiesen.

Kapitel 6.3 vergleicht systematisch die klimatische Steuerung von Jahrringdichten (*Picea tienschanica*) und Jahrringbreiten (*Juniperus spec.*) in Kirgistan. Korreliert werden Baumdaten mit meteorologischen Messungen (vgl. Kap. 3.2: Station Naryn) sowie Jahrringbreiten und -dichten zueinander. Mit diesem Ansatz sind die Korrelationsberechnungen abgeschlossen, und in Kapitel 6.4 kann eine fundierte Rekonstruktion angestrebt werden. Diese konzentriert sich auf die Baumstandorte und Wellenlängen, die am stärksten durch ein Klimaelement determiniert sind. Es wird gezeigt, in welcher Form mittelfristige Wachstumsvariationen an der oberen Waldgrenze in Pakistan Temperaturvariationen seit AD 790 reflektieren. Die Rekonstruktion wird abschließend mit den Erkenntnissen aus der Extremjahranalyse und den säkularen Trends zu einem Gesamtbild verschweißt, den „Klimaevents (säkulare Trends, mittelfristige Variationen und überregionale Weiserjahre) im westlichen Zentralasien seit AD 618“.

## 6.1 Klimatische Steuerung interannueller Wachstumsvariationen in Pakistan

*8d*-Standortchronologien aus Pakistan, wie sie an verschiedenen Stellen bereits ausführlich besprochen wurden (vgl. Kap. 4.1, 4.2, 4.3), dienen als Grundlage für die Berechnung der klimatischen Limitierung des jährlichen Wachstums. Die entsprechenden Reihen resultieren aus der individuellen Division durch 101-jährige modellierte gleitende Mittelwerte (vgl. Kap. 2.1). Eine geeignete Glättung der Sequenzen betont mittelfristige Wachstumsvariationen. Werden die Chronologien jedoch nicht gefiltert, dominieren die Breienschwankungen von Jahr zu Jahr. Sie entscheiden letztlich darüber, ob ein Korrelationskoeffizient zwischen der regionalen Klimareihe Mean6 (vgl. Kap. 3.2) und den Baumdaten hoch oder niedrig ausfällt.

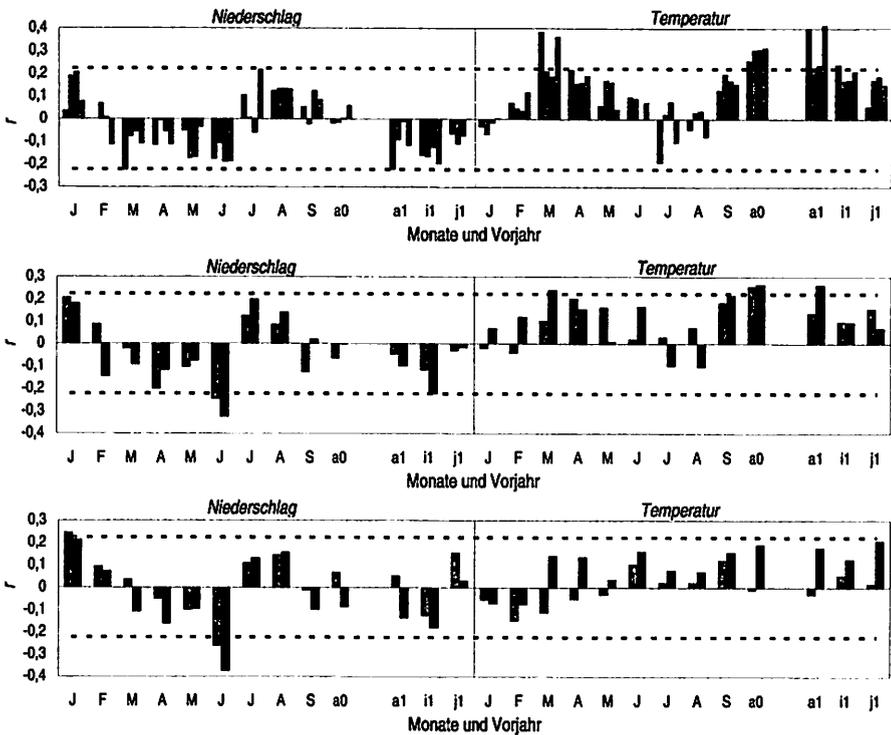


Fig. 24: Korrelationskoeffizienten der regionalen Klimareihe zu Standortchronologien (AD 1900-75) (a0 = Jahr, a1 = Vorjahr, i1 = Mai & Jun Vorjahr, j1 = Jul & Aug Vorjahr)  
**A**: Mean6 zu Mor1-4 (Mor1 = dunkelgrau, Mor2 = hellgrau, Mor3 = dunkelgrau, Mor4 = hellgrau)  
**B**: Mean6 zu Chap1-3 (Chap1 = hellgrau, Chap2 & 3 = gemeinsam dunkelgrau)  
**C**: Mean6 zu Bag1-2 & 4-5 (Bag1 & 2 gemeinsam = hellgrau, Bag4 & 5 gemeinsam = dunkelgrau)

Zunächst wird der Einfluß der Temperaturen und Niederschläge in einzelnen Monaten im Vergleich zu den Jahresmittelwerten untersucht. Figur 24 zeigt die entsprechenden Koeffizienten nach Pearson, wenn Mean6 mit Standorten aus dem NW-Karakorum korreliert wird. Auf den Abszissen sind die Korrelationen von Januar (J) bis September (S), die Jahreswerte (a0) und Vorjahreswerte (a1) sowie der Mai/Juni (j1) und Juli/August (j1) des Vorjahres aufgetragen. Figur 24 A illustriert die Zusammenhänge an den Hochlagenstandorten des Morkhun Tals. Mor1 bis Mor4 sind im Wechsel als hell- und dunkelgraue Säulen in das Histogramm eingezeichnet. In B wurden die Hochlagenstandorte Chap2 und Chap3 zusammengefaßt, mit Mean6 korreliert (dunkelgraue Säulen) und dem Tieflagenstandort im Transekt (Chap1) gegenübergestellt (hellgraue Säulen). C präsentiert schließlich die Koeffizienten der N-exponierten Standorte Bag1 und Bag2 (hellgraue Säulen) im Ver-

gleich zu den S-exponierten Bag4 und Bag5 (dunkelgraue Säulen). In allen Fällen werden Jahrringe und meteorologische Daten von AD 1900 bis 1975 berücksichtigt (= 76 Wertepaare). Die entsprechenden 95%-igen Signifikanzniveaus sind als horizontale gestrichelte Linien eingezeichnet.

Bei der Diskussion sind die hohen Autokorrelationen der Jahrringsequenzen (vgl. Kap. 4.1, Tab. 4) und die negative Korrelation zwischen Niederschlag und Temperatur (vgl. Kap. 3.2, Fig. 9) zu berücksichtigen. Letzteres ist relevant, wenn beispielsweise negative Korrelationen zum Niederschlag bei den entsprechenden Temperaturen positiv gespiegelt erscheinen. So sind die Zusammenhänge zwischen Jahrringbreite und Märztemperaturen an den Standorten des Morkhun Tals durchgehend positiv (Fig. 24 A), die, zu den entsprechenden Niederschlägen in der gleichen Hierarchie zwischen Mor1 bis Mor4 (Mor1 = stärkster Zusammenhang usw.) negativ. Zu beträchtlichen Anteilen können derartige Konstellationen auf die negative Rückkopplung zwischen den Klimaelementen zurückgeführt werden. Auf der anderen Seite gibt es zahlreiche Fälle, in denen Korrelationen zu den Klimaelementen unabhängig erscheinen. Beispielsweise sind die Übereinstimmungen zwischen den Jahrringbreiten und den Januarniederschlägen an den Standorten des Chaprot Tals (B) fast signifikant positiv. Zu den Temperaturen hingegen bestehen keine Ähnlichkeiten. Hier ist die Zuordnung zu einem limitierenden Klimaelement eindeutig.

Die Vorjahreseinflüsse ( $a_1$ ,  $i_1$  und  $j_1$ ) bestätigen in fast allen Fällen die Zusammenhänge aus den aktuellen Jahren (z.B. A:  $T_{(a0)}$  positiv,  $T_{(a1)}$  positiv). Grund dafür ist die langwellige Information in den  $\delta d$ -Chronologien, die mit einiger Wahrscheinlichkeit auf einen schmalen Jahrring einen weiteren schmalen folgen lassen. Der rechnerische Ausweg, die Jahrringdaten so lange zu indexieren, bis die Autokorrelation 1. Ordnung nahe Null liegt, scheint wenig sinnvoll, zeigen die (positiv autokorrelierten)  $\delta d$ -Daten doch das originäre Signal, das von den Bäumen ausgeht (vgl. Anhang I, unten). Demnach gibt es tatsächlich Einflüsse des Klimas, die über das Jahr X hinausgehen. Wahrscheinlich beruht dieses „Gedächtnis der Bäume“ auf Extremereignisse im Klima, die das Wachstum über mehrere Jahre positiv oder negativ beeinflussen und kontinuierliche Berechnungen erschweren. An dieser Stelle ist das erklärte Ziel, das entscheidende Klimaelement und die entscheidende Saison (einzelne Monate, Vegetationsperiode oder ganzes Jahr?) zu finden. Daher werden die Säulen relativ zueinander interpretiert, weniger interessant und auch sinnvoll ist die Diskussion der Koeffizienten im Detail.

An den Hochlagenstandorten des Morkhun Tals (A), die alle über 3600m NN liegen, ist ein klares Frühjahr- bis Frühsommersignal archiviert. Sind die Monate März bis Juni (abnehmende Intensität) warm, wirkt sich dies positiv auf die Biomassenproduktion aus. Gleichzeitig ist eine negative Beziehung

zum Niederschlag bis in den Juni vorhanden. In den Sommermonaten, bei ausreichend Wärme im Juni, Juli und August, geht die Limitierung durch die Temperatur verloren. Zugleich gewinnen Niederschlagsereignisse auch an diesen Standorten nahe der oberen Waldgrenze an Einfluß auf den Jahrring, ohne jedoch Signifikanz zu erzielen.

Signifikante und an allen vier Standorten bestätigte Korrelationen bestehen zu den Jahrestemperaturen ( $T_{(a0)}$ ), wohingegen die  $NS_{(a0)}$  keine Bedeutung haben. Dieser Effekt wird durch die Vorjahresbeeinflussung bzw. die Informationsweitergabe in den Jahrringsequenzen gestützt. Der Vorjahreseinfluß durch die Jahresmitteltemperaturen ( $T_{(a1)}$ ) ist durchgehend signifikant und erreicht an Mor1 und Mor4 maximale Werte. Die Mai/Juni-Temperaturen des Vorjahres ( $T_{(j1)}$ ) bestätigen die Wirkung dieser Monate aus dem aktuellen Jahr, wogegen die Juli/August-Beeinflussung ( $T_{(j1)}$ ) im Vorjahr positiv ist, ganz im Gegensatz zum Juli/August des aktuellen Jahres ( $T_{(j0)}$ ). Die Niederschläge spielen insbesondere bei den Jahresmittelwerten  $a0$  eine untergeordnete Rolle. Insgesamt ist an den Hochlagenstandorten Morkhuns eine durchgehende Abhängigkeit zur Jahres- und Vorjahrestemperatur archiviert. Dabei kommt den Frühjahr- und Frühsommertemperaturen des aktuellen Jahres eine entscheidende Bedeutung zu.

Der Gesamteindruck aus Figur 24 B bestätigt die Befunde von den Hochlagenstandorten des Morkhun Tals. Es existieren signifikante Abhängigkeiten bei der Jahres- bzw. Vorjahrestemperatur und keine bzw. nur geringe bei den entsprechenden Niederschlägen. Ebenfalls geht von den Januar-niederschlägen ein positiver Zusammenhang aus, und das Frühjahr und der Frühsommer müssen warm und trocken sein, damit ein breiter Jahrring wächst. Auffällig sind im Gegensatz zu Morkhun die signifikant negativen Koeffizienten des Niederschlags im Juni.

Die Differenzen zwischen den Tief- und Hochlagen (hellgraue und dunkelgraue Säulen) sind wider Erwarten gering. Wie bereits die Einzeljahanalyse (vgl. Kap. 5.2) gezeigt hat, liegen die Unterschiede zwischen den Verbreitungsgrenzen im Detail. Korrelationen mit Sequenzen von 76 Jahrringen (AD 1900 bis 1970), wie sie Figur 24 illustriert, nivellieren kleinere Unterschiede in einzelnen Jahren vollends. Festzuhalten bleibt, daß die entscheidende Wirkung von den Jahresmitteltemperaturen ausgeht, wobei die Informationsweitergabe vom Vorjahr ( $T_{(a1)}$ ) an den Hochlagenstandorten größere Bedeutung hat.

Die Frage nach den Abhängigkeiten von Klimafaktoren in verschiedenen Expositionen untersucht Figur 24 C (hellgraue Säulen = N-Exposition, dunkelgraue = S-Exposition). Die vertikale Differenzierung innerhalb des Bagrot

Tals ist unterdrückt, da jeweils zwei Standorte aus verschiedenen Höhen über NN zusammengefaßt sind. Die N-exponierten Chronologien rekrutieren sich aus Mischbeständen mit *Picea smithiana* (Wallich) Boiss., *Pinus wallichiana* A.B. Jackson und *Juniperus excelsa* Bieb.

Der entscheidende Unterschied zu den in A & B diskutierten Koeffizienten ist die differenzierende Wirkung der Jahresmitteltemperaturen ( $T_{(a0)}$ ,  $T_{(a1)}$ ). Sie ist in der S-Exposition – wie gewohnt – hoch, verliert allerdings an den N-exponierten Standorten völlig an Bedeutung. Dies trifft auch auf die Informationsweitergabe bei  $T_{(g0)}$  und  $T_{(g1)}$  zu. Ist das aktuelle Jahr oder das Vorjahr warm, wächst an den S-exponierten Standorten mit einiger Wahrscheinlichkeit ein breiter Jahrring und umgekehrt. Die N-exponierten, feuchten Mischbestände reagieren nicht auf interannuelle Temperaturvariationen. Wiederum ist (in beiden Expositionen) eine positive Beeinflussung durch einen feuchten Januar und negative durch das Frühjahr und den Frühsommer dokumentiert. Ist der Juli sehr feucht und kalt, wachsen die Bäume im Bagrot Tal schlecht.

Die dominierend limitierende Wirkung der Jahres- und Vorjahrestemperaturen gilt auch für zahlreiche andere Standorte Pakistans. Ein Grund dafür, daß die generalisierenden Jahresmittelwerte vergleichsweise starke Zusammenhänge zeigen, liegt mit Sicherheit an der mangelhaften Repräsentativität der Klimastationen im NW-Karakorum und benachbarter Räume. Variationen in einzelnen Monaten verlieren aufgrund der horizontalen Distanzen und vor allem wegen der vertikalen Gradienten (vgl. Kap. 1.2) an Aussagekraft. Dies bedeutet nicht zwingend, daß die Bäume nicht sensitiv sind oder gar, daß in ihnen kein saisonales Signal archiviert ist.

Figur 25 verdeutlicht die Rolle der Jahrestemperaturen an den Standorten des Morkhun und Chaprot Tals. Als horizontale gestrichelte Linie ist das 95%-ige Signifikanzniveau eingetragen. Die Säulen an Mor1 bis Mor4 entsprechen Figur 24. Im Bagrot und Chaprot Tal sind jedoch die einzelnen Standorte dargestellt. Eine wesentliche Rolle nimmt die „Masterchronologie“ PakHoch (Säulen ganz rechts) ein. Als PakHoch wird eine Mittelkurve aus neun pakistanischen Hochlagenstandorten bezeichnet.<sup>40</sup> Da die hoch- und niederfrequenten Variationen zu großen Anteilen zwischen den Standorten synchron sind (vgl. Kap. 4.2), ist PakHoch Ausdruck des regionalen Klimas nahe der oberen Waldgrenze in Pakistan. Kapitel 4.3 belegt außerdem, daß zahlreiche Jahrringbreitenschwankungen zwischen PakHoch und den Hochlagen in Kirgistan parallel sind (Fig. 18).

---

<sup>40</sup> Dazu zählen Chap2 & 3, Mor1-4, Sat2 & 3 und HUN. Die maximale Belegungsdichte ist 114 (vgl. Kap. 4.3).

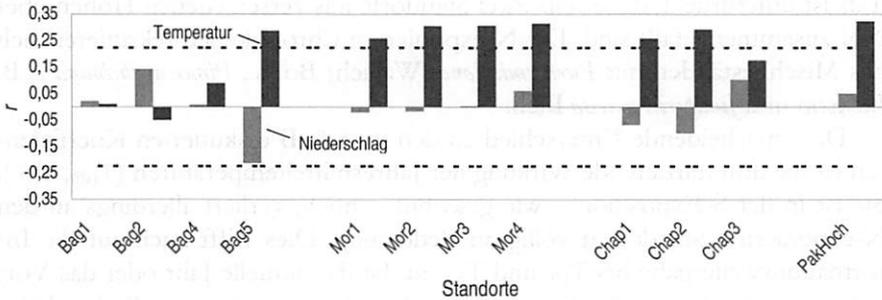


Fig. 25: Korrelation Mean6 zu 8d-Standortchronologien (AD 1900-75), NS(a) = hell, T(a) = dunkelgrau

An zahlreichen Standorten des NW-Karakorum können signifikante Anteile der Jahringbreiten durch die Jahresmitteltemperatur erklärt werden. Nur in wenigen Ausnahmen, wie an den N-exponierten Bagrotstandorten (Bag1, Bag2), bricht dieser Zusammenhang ein oder ist reduziert, wie am S-exponierten Bagrotstandort (Bag4) und dem Hochlagenstandort Chap3. An allen weiteren dargestellten Untersuchungsflächen ist der Bezug zum Klima eindeutig. Die Jahresmitteltemperaturen von AD 1900 bis 1975 beeinflussen signifikant die Jahringbreiten AD 1900 bis 1975.<sup>41</sup>

Am stärksten ist dieser Zusammenhang in der Masterchronologie Pak-Hoch ausgeprägt, der Mittelkurve aus allen neun pakistanischen Hochlagenstandorten (ohne Bagrot). Durch die Zusammenführung von neun Hochlagenstandorten ist die generelle Information optimal dokumentiert und zeigt die stärkste Abhängigkeit von der ebenfalls generalisierenden Jahresmitteltemperatur von Mean6, die aus sechs meteorologischen Stationen zusammengesetzt ist (vgl. Kap. 3.2).

Als Überleitung zur Kalibration der gefilterten Low-Frequency Variationen (vgl. Kap. 6.2) und zur Vertiefung der erkannten Abhängigkeiten wird die zeitabhängige Korrelation in einem definierten Gleitfenster diskutiert. Die Frage ist, wie die Abhängigkeiten zu T(a) und NS(a) in verschiedenen Dekaden aussehen.

Figur 26 zeigt unten die Masterchronologie PakHoch von AD 1876 bis 1990. Deutlich ist erkennbar, daß die nicht gefilterte Kurve durch das interannuelle

<sup>41</sup> Zu bedenken ist, daß sechs unterschiedlich lange Stationen zu Mean6 zusammengefaßt sind (vgl. Kap. 3.2). Dabei bestimmt die längste Stationsreihe die Zeitscheibe der regionalen Klimareihe Mean6. An den Enden und insbesondere im 19. Jh. nimmt die Anzahl an Stationen, die zu Mean6 beitragen, ab. Außerdem ist in den alten Abschnitten generell mit einer Verschlechterung der Datenqualität zu rechnen. Deshalb sind die Berechnungen in den Figuren 24 und 25 auf AD 1900 bis 1975 beschränkt.

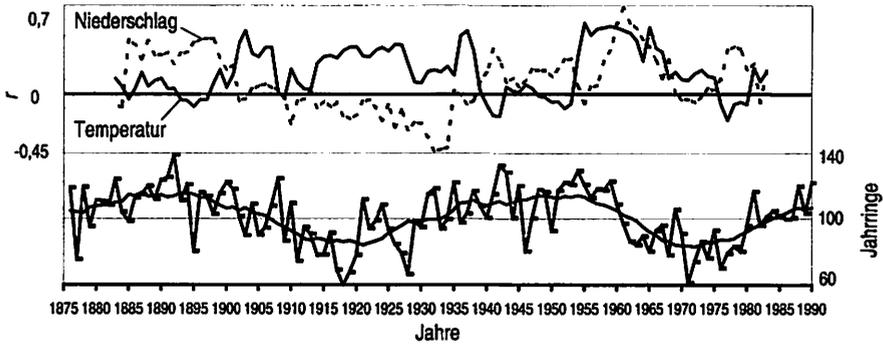


Fig. 26: Gleitkorrelation in einem 15-jährigen Zeitfenster zwischen Mean6 ( $T(a)$ ,  $NS(a)$ ) und der 8d-Hochlagenchronologie PakHoch in Pakistan (AD 1883-1983)

Signal bestimmt wird. Ein 15-jähriger ungewichteter gleitender Mittelwert betont die niederfrequenten Schwankungen, von denen sich die jährlichen Variationen abheben. Oben sind die Korrelationskoeffizienten zwischen dem hochfrequenten Jahrringsignal und  $NS_{(a)}$  (gestrichelt) bzw.  $T_{(a)}$  von Mean6 in einem 15-jährigen gleitenden Fenster zu sehen. Um den 15-jährigen Zeitraum für die Korrelationen aufrecht zu halten, sind die Gleitkorrelationen an den Kurvenenden auf AD 1883 bis 1983 verkürzt worden (Mean6 = AD 1876–1990).

Die Korrelationskoeffizienten sind in Abhängigkeit von der Zeit nicht stabil. Vielmehr können in einzelnen Phasen sowohl der Niederschlag als auch die Temperatur signifikant positive Zusammenhänge aufweisen. Beispielsweise korrelieren breite Jahrringe mit hohen Niederschlägen zwischen AD 1884 und 1900. AD 1913 bis 1937 hingegen korreliert die kambiiale Aktivität positiv mit  $T_{(a)}$ . Häufig verhält sich das jeweils andere Klimaelement gegensätzlich. Zwischen AD 1955 und 1968 ist indes sowohl die Temperatur als auch die Niederschlagkurve hoch.

Vergleicht man die Kurven der Korrelationskoeffizienten mit den zugrunde liegenden Jahrringdaten, fällt auf, daß signifikante Einbrüche bei der Jahresmitteltemperatur in Perioden guten Wachstums stattfinden, z.B. AD 1885 bis 1898 oder AD 1939 bis 1953. Vereinfacht gesagt, bricht der Zusammenhang zu  $T_{(a)}$  in Phasen breiter Jahrringe zusammen. Gleichzeitig steigt in diesen Dekaden der Zusammenhang mit dem annuellen Niederschlag. Da die Temperaturen Ende des 19. und in der Mitte des 20. Jh.s überdurchschnittlich hoch waren (vgl. Kap. 6.2, Fig. 27), ergibt dies folgendes Bild: In warmen Dekaden wachsen die Bäume an der oberen Waldgrenze schneller; mit dem Temperaturüberschuß sinkt aber gleichzeitig die Abhängigkeit der Jahrringbreite von  $T_{(a)}$  (AD 1885–1898, AD 1939–1953). Die limitierende Wirkung ist offensichtlich an mittelfristigen Temperaturmangel geknüpft.

## 6.2 Klimatische Steuerung niederfrequenter Signale in Pakistan

In der dendroklimatologischen Praxis werden meist hochfrequente, interannuelle Variationen der Jahrringbreite oder -dicke mit entsprechenden meteorologischen Aufzeichnungen korreliert. Nach einer systematischen Kalibration und Verifikation in unabhängigen Zeitscheiben werden dann jedoch i.d.R. niederfrequente Klimaschwankungen rekonstruiert. Im vorliegenden Datensatz wäre die Berechnung eines Transfermodells auf Grundlage der in Kapitel 6.1 herausgearbeiteten Zusammenhänge zur Jahresmitteltemperatur ( $T_{(a)}$ ) von Mean6 mit eingeschränkten Wahrscheinlichkeiten möglich. Es wurde aber angedeutet, daß bereits in den nicht gefilterten *8d*-Chronologien niederfrequente Schwankungen in Dekadenlänge enthalten sind. Diese beeinflussen ohne Zweifel die diskutierten Resultate bei den interannuellen Wachstumsvariationen. Hier werden nun die niederfrequenten Variationen fokussiert. Um das Low-Frequency Signal herauszustellen und die hochfrequenten Variationen zu unterdrücken, wird ausschließlich mit tiefpaßgefilterten Reihen gearbeitet. Sowohl die Masterchronologie der pakistani-schen Hochlagenstandorte PakHoch als auch die Aufzeichnungen des Niederschlags und der Temperatur von Mean6 sind mit einem 15-jährigen ungewichteten gleitenden Mittelwert geglättet worden.<sup>42</sup> Die Frage ist nun, ob und in welcher Form die hinlänglich diskutierten niederfrequenten Variationen der Jahrringbreiten bei den meteorologischen Messungen vorhanden sind.

Figur 27 A & B zeigt die gefilterten Jahresniederschläge und -temperaturen von sechs Stationen (vgl. Kap. 3.2: Peshawar, Lahore, Simla, Ludhiana, Murree und Gilgit) als dünne Linien<sup>43</sup> und die entsprechende regionale Mittelkurve Mean6 als dicke gestrichelte Linie. Die Erfassung der Niederschläge setzte an einigen Stationen etwas früher ein als die der Temperaturen, weshalb diese Sequenzen bis AD 1863 zurück reichen (B:  $T_{(a)}$  bis AD 1876). Als dicke Linie ist jeweils das Low-Frequency Signal der Hochlagenstandorte in Pakistan dargestellt (vgl. Kap. 4.1, 4.2, 4.3). Die meteorologischen

<sup>42</sup> Die Stationsreihen wurden bei der Filterung nicht gekürzt. Deshalb erfassen die entsprechenden Tiefpaßfilter an den Enden zunehmend weniger Jahre, bis schließlich an den Extremen nur noch acht Jahre (= einseitige Filterlänge plus letztes Jahr) gemittelt werden. Aufgrund der Filterverkürzung sind die dargestellten Reihen an den Kurvenenden unruhiger.

<sup>43</sup> Aufgrund der Datenfülle können die einzelnen Stationsreihen nicht durch unterschiedliche Liniensignaturen kenntlich gemacht werden. Die Zuordnung einzelner meteorologischer Reihen ist aber auch nicht das Ziel. Wesentlich ist, ob die einzelnen Sequenzen niederfrequente Schwankungen nachzeichnen und wie gut die Mittelkurve Mean6 diese Stationen repräsentiert.

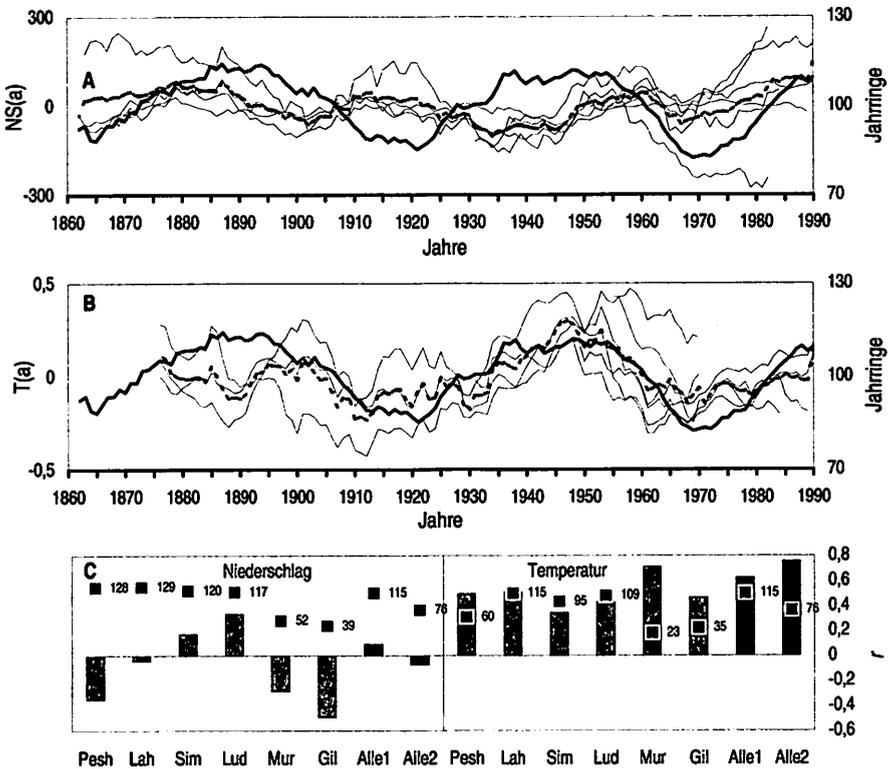


Fig. 27:  $T(a)$  und  $NS(a)$  im Vergleich zu PakHoch (8d-Hochlagenchronologie) und Korrelation  
 (A)  $NS(a)$  zu PakHoch: 6 Stationen (dünne Linie), Mittelkurve (unterbrochene), PakHoch (dicke Linie)  
 (B)  $T(a)$  zu PakHoch: Linien wie in (A) (C) Korrelationskoeffizienten zw. PakHoch und Stationen:  
 Ziffern = Anzahl Jahre, Alle1 = Mean6 (AD 1876-1990), Alle2 = Mean6 (AD 1900-1990)

Reihen sind durch die Berechnung der Residuen von den langjährigen Mittelwerten auf Null normiert worden (vgl. Kap. 3.2). Figur 27 C stellt schließlich die entsprechenden Korrelationskoeffizienten der Stationen und der Mittelkurve aus allen Meßreihen (Mean6) zu PakHoch zusammen. Die Ziffern in dem Diagramm geben die Längen der Stationsreihen bzw. die Anzahl der Jahre, die in die Berechnung einfließen, an. Dabei ist zu bedenken, daß die Signifikanzniveaus von der Anzahl der Wertepaare abhängig sind. „Alle1“ steht für den Zeitraum von AD 1876 bis 1990, also der maximalen Periode, von der sowohl Niederschlag- als auch Temperaturdaten vorliegen. Da vor allem in den älteren Jahrgängen Meßungenauigkeiten und Inhomogenitäten nicht auszuschließen sind, ist „Alle2“ auf den Zeitraum AD 1900 bis 1990 eingegrenzt. Durch die Filterung steigt in allen illustrierten Sequenzen die

Autokorrelation 1. Ordnung auf nahe eins. Es existiert demnach eine strenge Informationsfortpflanzung in den Reihen. Interessant ist nun, ob die niederfrequenten Variationen bei den Proxidaten und den meteorologischen Aufzeichnungen parallel, gegenständig oder unabhängig verlaufen.

Die Ergebnisse sind eindeutig. Während die niederfrequenten Variationen der Jahrringbreite durch die Jahresniederschlägen nicht bestätigt werden, zeichnen sich deutliche Parallelen zwischen den Hochlagenstandorten und den Jahrestemperaturen ab. Die Jahrringe folgen regelrecht dem durch die Stationsdaten vorgegebenem Temperaturtrend. Steigt  $T_{(a)}$  in den sechs meteorologischen Meßreihen, nehmen mittelfristig auch die Jahrringbreiten zu. Sinken die mittleren Temperaturen, wachsen die Bäume an der oberen Waldgrenze des NW-Karakorums schlechter. Dieser Zusammenhang wird an allen Klimastationen bestätigt. Er ist besonders hoch zur regionalen Klimareihe Mean6. Bei den Jahresniederschlägen hingegen ist visuell keine Abhängigkeit festzustellen. Auch sind die Parallelen zwischen den einzelnen Stationsreihen bei weitem nicht so deutlich, wie die der  $T_{(a)}$ , weshalb Mean6 NS<sub>(a)</sub> (A: gestrichelte Linie) die einzelnen Reihen auch nur unzureichend repräsentiert.

Die visuellen Abhängigkeiten werden durch die Berechnung von Korrelationskoeffizienten nach Pearson bestätigt (C). Während die Niederschlagsmessungen nur an der Station Ludhiana (Lud) auffallend positiv korrelieren, sind die Zusammenhänge zwischen den Temperatur- und Baumdaten durchgehend hoch. Lahore (Lah) erreicht bei 115 Wertepaaren einen Koeffizienten von 0,52. Wenn alle sechs Stationen zur Mittelkurve Mean6 zusammengefaßt werden – aufgrund der einfachen Normierung streuen die Einzelsequenzen zumindest phasenweise doch sehr deutlich – steigt der Zusammenhang für den Zeitraum AD 1876 bis 1990 (Alle1) auf 0,63. Schneidet man zusätzlich die möglicherweise unsicheren Messungen im 19. Jh. ab (Alle2), wird gar ein Wert von 0,76 erzielt. Die letzte Zunahme ist im Bild (Fig. 27 B) nachvollziehbar. Vor AD 1900 ist in Mean6  $T_{(a)}$  nahezu keine Low-Frequency Information gespeichert. Die gestrichelte Mittelkurve verläuft deutlich unterhalb der Jahrringbreiten, die hier einen Wellenberg nachzeichnen.

Bei den Niederschlagsmessungen werden im Mittel (Alle1, Alle2) keine Zusammenhänge festgestellt. Geht aus einzelnen Stationen (Fig. 27 C), wie Peshawar, Gilgit und reduziert auch Murree eine negative Abhängigkeit hervor, so wird dieser Trend durch die anderen Stationen nivelliert. Aufgrund der mehrfach angesprochenen Problematik in bezug auf die Repräsentativität und die räumliche Streuung der verschiedenen Stationen ist eine gezielte Argumentation anhand der einzelnen Koeffizienten nicht zu leisten.

Wesentlich ist, daß die Temperaturmessungen an allen Stationen mittelfristige Variationen aufweisen. Diese sind im Einzelfall und nach der Zusammenfassung zu einer regionalen Klimareihe (Mean6) in vielen Teilen syn-

chron mit den gefilterten Jahrringvariationen an der oberen Waldgrenze in Pakistan. Die Ähnlichkeit des Low-Frequency Signals zwischen den einzelnen Hochlagenstandorten wurde ausführlich verifiziert (vgl. Kap. 4.1, 4.2, 4.3). Dabei ist auch auf den Zusammenhang mit den mittelfristigen Wachstumsvariationen in Kirgistan hingewiesen worden (vgl. Kap. 4.4). Somit ist festzuhalten, daß (i) das synchrone Low-Frequency Signal an der oberen Waldgrenze des NW-Karakorums durch Temperaturvariationen ausgelöst wird. Dieser Zusammenhang ist derart intensiv, daß (ii) aufgrund der Ähnlichkeit zu den kirgisischen Hochlagenstandorten die Bedeutung der Temperatur mit Einschränkung auch auf den Tien Shan übertragen werden kann. Welche sogenannte „Forcing Factors“ derartige Schwankungen in den meteorologischen Reihen verursachen und indirekt auf die Proxidaten übertragen, bleibt an dieser Stelle offen. Eine systematische Untersuchung unter Berücksichtigung der Sonnenaktivität ist in Vorbereitung.

### 6.3 Methodenverbund aus Jahrringbreite und -dichte in Kirgistan

Die Idee, die diesem Kapitel zugrunde liegt, ist, durch die Hinzunahme eines weiteren Parameters, der maximalen Spätholzdichte, die Kalibration interannueller Variationen der Jahrringbreite bei Wacholder abzusichern. Die paläoklimatische Bedeutung densitometrisch ermittelter Reihen (SCHWEINGRUBER et al. 1978) ist erst jüngst wieder eindrucksvoll dokumentiert worden (BRIFFA et al. 1998a, 1998b). Demnach reflektieren Dichtechronologien von Koniferen aus den verschiedensten Regionen der gesamten Nordhemisphäre Spätsommertemperaturen. Für Kalibrationszwecke wurde von Prof. Dr. F.H. Schweingruber eine derartige Reihe von *Picea tienschanica* Rupr. aus dem zentralen Tien Shan (Sare Imek Tal: 41°-40'N/76°-26'E) oberhalb von Naryn zur Verfügung gestellt. Da der Standort in 2800m NN nahe der lokalen oberen Waldgrenze liegt, wird erwartet, daß eine Kalibration mit der unweit entfernten meteorologischen Reihe von Naryn (2049m NN, 41°-26'N/76°-00'E) die limitierende Wirkung der Spätsommertemperaturen verifiziert. Wenn dies gelingt, können in einer Art Methodenverbund die Jahrringbreitenchronologien der Wacholder aus dem Karagai Tal mit der Dichtechronologie verglichen werden. In dem Fall werden die densitometrischen Ergebnisse wie eine unabhängige Aufzeichnung von Spätsommertemperaturen behandelt. Zweitens werden die Jahrringbreiten der *Picea tienschanica* Rupr. und die der Wacholderbestände aus dem Süden Kirgistans getrennt den Messungen der Station Naryn gegenübergestellt. Diese Konzeption führt möglicherweise – trotz der hinlänglich diskutierten mangelhaften Repräsentativität der Stationsreihen gerade an den kirgisischen Wacholderstandorten – zu Erkenntnissen bezüglich der klimatischen Sensitivität im Karagai Tal.

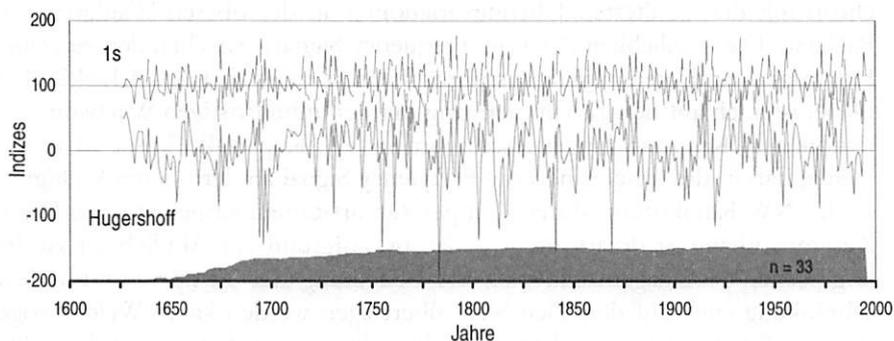


Fig. 28: *Picea tienschanica*, maximale Dichte-Chronologie (Index: Hugershoff, 1s) und Belegungsdichte

Figur 28 stellt die *Picea tienschanica*-Dichtechronologie vor. Grundlage für die abgebildeten Mittelkurven sind 33 einzeln indexierte Radien von 18 Bäumen. Fast alle Dichtechronologien, die an der WSL (Birmensdorf/CH) präpariert werden, werden von P. Nogler an der Hugershoff-Funktion (BRÄKER 1981, COOK et al. 1992b, WARREN 1980) trendeliminiert. Die Berechnung sieht eine Subtraktion der Rohwerte von den Hugershoff-Ausgleichswerten und nachträgliche Multiplikation mit zehn vor. Die einzelnen Radien werden dann zu einer Chronologie gemittelt (Figur 28, durchgezogene Linie). Für die Korrelationsberechnungen sind die Daten in einem zweiten Schritt 1s-indexiert worden. In den Residuen von einem kurzen, 5-jährigen gleitenden Mittelwert (1s) sind alle langfristigen Variationen eliminiert und lediglich die hochfrequenten Anteile, also die Variationen von Jahr zu Jahr, fließen in die Berechnung ein (vgl. Kap. 2.1). Die Effekte dieser Indexierung sind an der gestrichelten Kurve deutlich zu erkennen. Die 1s-Chronologie besteht aus einem ständigen „Auf und Ab“, wobei die interannuelle Standardabweichung gegenüber der Hugershoff-Chronologie nicht stabilisiert ist. Somit können nach wie vor Phasen unterschieden werden, in denen die Dichten stärker oder geringer streuen.

Um eine maximale Vergleichbarkeit zu erzielen, sind die Jahringbreitenchronologien der Wacholder aus dem Karagui Tal und die meteorologischen Meßreihen der Station Naryn nach dem gleichen Verfahren indexiert worden. Dabei ist zu beachten, daß auch hier die Autokorrelation 1. Ordnung durchgehend negativ wird, was ohne Zweifel bereits an der 1s-Dichtechronologie in Figur 28 zu erkennen ist. Dieses statistische Artefakt wird in Kauf genommen, um die jährlichen Variationen zu betonen und die Vergleichbarkeit zwischen den Datensätzen zu erhöhen. Die Diskussion potentieller Vorjahreseffekte ist natürlich ausgeschlossen.

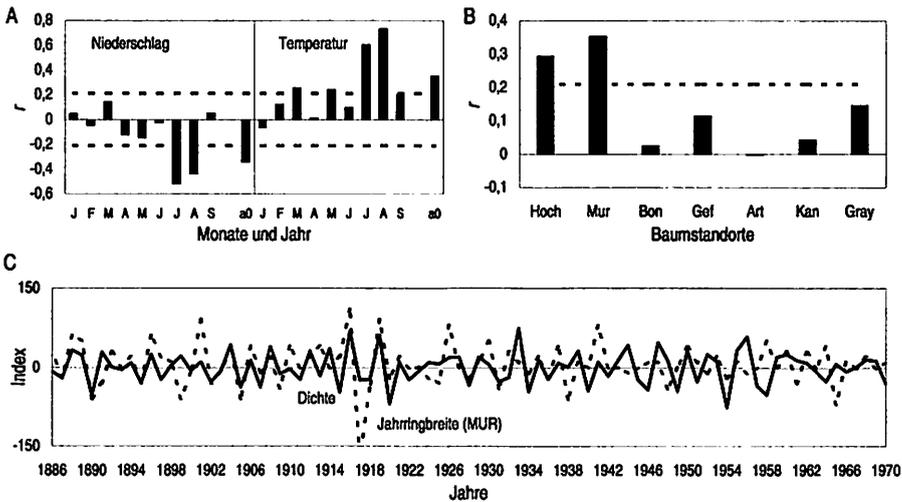


Fig. 29: Korrelation zwischen Klima-, Dichte- und Jahringbreitenreihen AD 1886-1970 (1s-Indizes)  
 (A) *Picea tienschanica*-Dichte zu Naryn (Klimastation): Jan bis Sep, a0 = Jahreswerte  
 (B) *Picea tienschanica*-Dichte zu Jahringbreite (Karagui Tal)  
 (C) Dichte (*Picea tienschanica*) und Jahringbreite (*Juniperus turk.*, Standort MUR)

Figur 29 präsentiert einen Ausschnitt aus den umfangreichen Analysen des Methodenverbunds. Dargestellt sind die Korrelationskoeffizienten der maximalen Spätholzdichte von *Picea tienschanica* Rupr. zu den Niederschlägen und Temperaturen, gemessen an der nahegelegenen Station Naryn (A). „a0“ steht wiederum für die Jahresmittelwerte der Temperatur  $T_{(a)}$  und des Niederschlags  $NS_{(a)}$ . In B sind die Koeffizienten zusammengestellt, wenn die einzelnen Wacholderstandorte des Karagui Tals direkt mit der Dichtechronologie korreliert werden. Die Zeitspanne entspricht auch hier der Länge der Stationsdaten von Naryn (AD 1886 bis 1970).<sup>44</sup> Schließlich illustriert C die Chronologie der maximalen Spätholzdichten seit AD 1886 und stellt sie den Jahringbreiten von *Juniperus turkestanica* Kom. am Hochlagenstandort MUR gegenüber.

Aus dem Histogramm A geht hervor, daß die maximale Spätholzdichte höchst signifikant mit der Spätsommertemperatur (Juli, August) korreliert. Gleichzeitig wird das 99%-ige Signifikanzniveau bei den Niederschlägen überschritten. Der Literatur (z.B. BRIFFA et al. 1998a, 1998b) ist zu entneh-

<sup>44</sup> Als horizontale gestrichelte Linien sind die 99%-igen Signifikanzniveaus eingetragen. Da in A und B jeweils 84 Wertepaare (AD 1886 bis 1970) korreliert werden, schneiden die Geraden in beiden Abbildungen bei +0,21 bzw. -0,21 die Ordinate.

men, daß das Temperatursignal das originäre ist. Das Niederschlagsignal hingegen kann als sogenanntes „Resonanzsignal“ bezeichnet werden, hervorgerufen durch systematisch reduzierte Temperaturen bei Niederschlagsereignissen (vgl. Kap. 3.2). Im Gegensatz zu den pakistanischen Wacholderstandorten (Jahringbreite) ist die Bedeutung der generalisierenden Jahresmittelwerte ( $a_0$ ) vergleichsweise gering. Zwar korreliert die maximale Spätholzdichte signifikant zu diesen Parametern, allerdings werden die Koeffizienten durch die Ausprägungen in den Monaten Juli und August weit übertroffen. Ist der Spätsommer eines Jahres kalt und im Mittel somit auch feuchter, ist das Zellwandwachstum in den Spätholzzellen von *Picea tienschanica* reduziert, die maximale Spätholzdichte ist gering.

Korreliert man die Dichtechronologie von *Picea tienschanica* mit den sieben Jahringbreitenchronologien der Wacholderbestände im Karagui Tal (B), wird deutlich, daß alleine die hochgelegenen Standorte HOCH und MUR signifikante Ähnlichkeiten aufweisen. Demnach sind Anteile des Spätsommersignals zur Temperatur, das ja durch die Dichtechronologie ausgedrückt wird, an den kühl-feuchten *Juniperus turkestanica*-Standorten archiviert. Von Vorteil bei diesem Vergleich zwischen Dichte und Breite ist, daß die *Picea*-Bestände die Situation in 2800m NN widerspiegeln. Auch wenn die Messungen an der Station Naryn genauer sind, stehen sie doch für die Bedingungen in nur 2049m NN.

In allen anderen Wacholderchronologien ist der Zusammenhang mit den Dichten niedriger. Der tiefgelegene S-exponierte Standort ART weist überhaupt keine Ähnlichkeit mehr zu den Fichten des zentralen Tien Shan auf. Hier ist ganz offensichtlich die Beeinflussung durch die Spätsommertemperaturen nicht ausgeprägt, und andere Klimafaktoren verursachen die synchronen Wachstumsvariation von Jahr zu Jahr.

Die Gegenüberstellung der maximalen Spätholzdichte von *Picea tienschanica* und Jahringbreite von *Juniperus turkestanica* am Standort MUR in Figur 29 C zeigt, daß der Zusammenhang nicht in allen Jahren gleichmäßig ausgebildet ist. Zwischen AD 1886 und 1942 sind die Variationen von Jahr zu Jahr synchroner. Im Mittel korrelieren die Sequenzen in dieser Phase mit  $r = 0,504$  (Signifikanzniveau bei ca. 0,35). Diese Ähnlichkeit persistiert jedoch nicht bis zur Waldkante, denn nach AD 1942 sind immer mehr Jahre gegenständig. Dieser Befund kann nicht abschließend geklärt werden. Möglicherweise ist eine zunehmende menschliche Beeinflussung der naturnahen Bestände ab der Mitte des 20 Jh.s ursächlich.

Auffallend deckungsgleich hingegen ist die Situation von AD 1916 (hohe Dichte, breiter Jahring) bis AD 1919. Die negativen Jahre AD 1917 und 1918 sind sowohl bei der Dichte als auch der Breite evident. AD 1917 ist ein überregionales Weiserjahr an den pakistanischen und kirgisischen Wacholder-

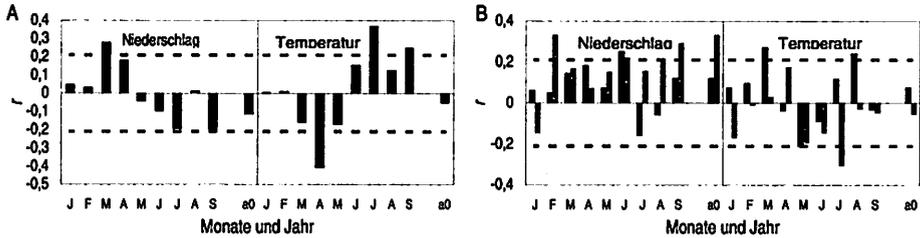


Fig. 30: Korrelation zw. Jahringbreite *Picea tienschanica* bzw. *Juniperus spez.* zu Naryn AD 1886-1970  
 (A) *Picea tienschanica* zu Temperatur & Niederschlägen, a0 = Jahreswerte  
 (B) *Juniperus* zu Temperatur und Niederschlägen: dunkelgrau = MUR, hellgrau = ART

standorten (vgl. Kap. 5.2) sowie den *Picea*-Beständen, das infolge stark reduzierter Temperaturen offensichtlich für den gesamten westlichen Raum Zentralasiens Gültigkeit hat.

Figur 30 greift die Ergebnisse des Breite/Dichte-Vergleichs auf und korreliert die Jahringbreite von *Picea tienschanica* (Sare Imek Tal) sowie von *Juniperus turkestanica* (Karagui Tal, Standort MUR und ART) mit den Messungen der Station Naryn von AD 1886 bis 1970.<sup>45</sup> Bei der Ausprägung der Histogramme ist zu bedenken, daß im Gegensatz zu den Fichtenstandorten die *Juniperi* über 200 km von der zentralkirgisischen Station Naryn entfernt wachsen. Die horizontal gestrichelten Linien entsprechen dem 95%-igen Signifikanzniveau. In B sind als dunkelgraue Säulen die Koeffizienten des Standorts MUR und hellgrau die des Standorts ART eingetragen.

Die Jahringbreiten von *Picea tienschanica* korrelieren ähnlich wie die maximalen Spätholzdichten, erzielen jedoch bei weitem nicht die gleichen Signifikanzen. Hohe Koeffizienten werden im Hochsommer und zum Ende der Vegetationsperiode bei den Temperaturen erreicht. Abweichend von den Dichten geht vom Frühjahr (März und April) ein positiver Zusammenhang mit den Niederschlägen und gleichzeitig ein negativer mit den Temperaturen aus. Demnach ist die Wahrscheinlichkeit, daß Fichten an der oberen Waldgrenze im zentralen Tien Shan einen breiten Jahring bilden, dann hoch, wenn die Vegetationsperiode (insbesondere Juli) warm ist. Förderlich für das Wachstum ist ein niederschlagreiches kühles Frühjahr.

<sup>45</sup> Im Gegensatz zu den maximalen Spätholzdichten werden die Jahringbreiten von *Picea tienschanica* Rupr. durch Hugershoff-Ausgleichsfunktionen dividiert. Der Skalierungsfaktor ist (mal) 1000. Von der resultierenden Hugershoff-Chronologie werden dann 1s-Indizes (vgl. Kap. 2.1) gerechnet. Die Jahringbreitensequenzen der Wacholder werden vor der Berechnung von Chronologien einzeln 1s-indiziert.

B stellt zwei sehr unterschiedliche Wacholderstandorte des südlicher gelegenen Karagui Tals gegenüber. MUR ist eine hochgelegene Untersuchungsfläche, feucht und nahe der oberen Waldgrenze. ART hingegen ist viel tiefer in S-Exposition lokalisiert und einer der trockensten Standorte im Karagui Tal (vgl. Kap. 1.2). Aus den Korrelationskoeffizienten geht hervor, daß ART insgesamt und vor allem beim Jahresmittelwert  $a_0$  ( $r = 0,294$ ) deutlich positiver mit den Niederschlägen übereinstimmt als MUR. Zu  $T_{(a)}$  werden keine Signifikanzen erzielt.

Wo aber weicht der hochgelegene feuchte Standort MUR ab? Im März besteht ein signifikant positiver Zusammenhang zur Temperatur. Auffällig sind die Unterschiede im Sommer (Juli, August), da am Standort MUR breite Jahrringe wachsen, wenn die Temperaturen hoch sind. Hier reagiert der hochgelegene Wacholderbestand ähnlich wie der waldgrenznahe Fichtenstandort (A) und bestätigt die Übereinstimmungen mit der maximalen Spätholzdicke aus Figur 29.

Festzuhalten bleibt, daß (i) maximale Spätholzdichten von *Picea tienschanica* Rupr. nahe der oberen lokalen Waldgrenze Spätsommertemperaturen reflektieren. Diese können allein und zusätzlich zu meteorologischen Meßreihen für die Kalibration von Jahrringbreiten verwendet werden. In den Jahrringbreiten hochgelegener feuchter Wacholderbestände des südlichen Tien Shan ist (ii) ein abgeschwächtes Temperatursignal im Spätsommer archiviert. Vergleiche zwischen der oberen Waldgrenze und tiefer gelegenen trockenen Standorten zeigen, daß die Bedeutung der Niederschläge von oben nach unten zunimmt. Temperaturvariationen – dies wird durch die Ähnlichkeit der Hochlagen in Pakistan und Kirgistan unterstützt – sind (iii) maßgeblich für das Wachstum von *Juniperus turkestanica* nahe der oberen Waldgrenze im Karagui Tal des Tien Shan.

Somit existieren zahlreiche Indizien, die die Rolle der Temperatur bei der Limitierung interannueller Jahrringvariationen nahe der oberen Waldgrenze dokumentieren. Allerdings sind die Zusammenhänge von der Intensität her bei weitem nicht mit der Steuerung des Low-Frequency Signals zu vergleichen (vgl. Kap. 6.2). Mittelfristige Wachstumsvariationen sind die dominierende Wellenlänge im Zuwachs der Wacholder, und sie werden eindeutig durch Temperaturvariationen in Dekadenlänge verursacht.

## 6.4 Temperaturrekonstruktion seit AD 790 in Pakistan

Die Dominanz der Jahrestemperaturen auf die Ausbildung mittelfristiger Wachstumsvariationen der Wacholder nahe der oberen Waldgrenze in Pakistan ist entscheidend für die Rekonstruktion mittelfristiger Klimaschwankungen seit AD 790. Grundlage ist die  $\delta d$ -Hochlagenchronologie PakHoch aus zueinander homogenen Standorten im NW-Karakorum (vgl. Kap. 4.2). Die Stabilität der klimatischen Steuerung wird zunächst in unabhängigen Zeitfenstern überprüft, um auf der Grundlage eines geeigneten Transfermodells Temperaturvariationen seit AD 790 zu rekonstruieren. Da die Rekonstruktion ausschließlich Temperaturschwankungen in Dekadenlänge erfaßt – säkulare Trends werden durch die gewählte  $\delta d$ -Indexierung eliminiert – wird schließlich eine Zusammenführung aller diskutierten Befunde oder Wellenlängen angestrebt. Mittelfristige Wachstumsschwankungen, die Temperaturschwankungen reflektieren, werden auf das rechnerisch unterdrückte Very-Low-Frequency Signal (vgl. Kap. 4.4: Säkulare Trends) regelrecht aufgepflanzt und mit den Ergebnissen aus der Extremjahrenanalyse (vgl. Kap. 5) zu einem Gesamtbild verschweißt.

Einfache Regressionsmodelle unterstellen lineare Abhängigkeit des Wachstums von den Temperaturen (Figur 31 A B C). Grundlage sind die bereits in Kapitel 6.2 diskutierten 15-jährigen ungewichteten gleitenden Mittelwerte der Jahrestemperaturen  $T_{(a)}$  der regionalen Klimareihe Mean6 (vgl. Kap. 3.2) und die ebenfalls gefilterte Masterchronologie der Hochlagenstandorte im NW-Karakorum PakHoch. Demnach erklären die Temperaturvariationen im maximalen Zeitfenster AD 1876 bis 1990 mit  $R^2 = 0,434$  die Gesamtvarianz der Wachstumsvariationen (C). Die Übereinstimmungen in den beiden Sequenzen – Regressor und Regressand – können in Figur 31 D visuell nachvollzogen werden. Als gestrichelte Linie sind die gefilterten Temperaturvariationen und als dicke geschlossene Linie die gefilterten Jahrringvariationen in PakHoch seit AD 1886 dargestellt. Die neun zueinander synchronen Hochlagenchronologien Chap2 & 3, Mor1-4, Sat2 & 3 und HUN, aus denen die Masterchronologie PakHoch berechnet wird, sind mit dünnen geschlossenen Linien eingezeichnet.

In A und B sind die Punktwolken und Regressionsgeraden für die Zeitscheiben AD 1946 bis 1990 und AD 1901 bis 1945 dargestellt. Aus den Bestimmtheitsmaßen  $R^2$  geht hervor, daß die Abhängigkeit der Jahrringbreite in den jüngeren Dekaden des 20. Jh.s geringer ist. Allerdings erklärt  $T_{(a)}$  von AD 1901 bis 1945 immer noch mit  $R^2 = 0,5703$  die Gesamtvarianz des Wachstums. Visuell (D) sind die unterschiedlichen Werte nur schwer nachvollziehbar. Jedoch fällt auf, daß nach AD 1946 Proxi und Temperatur äußerst eng

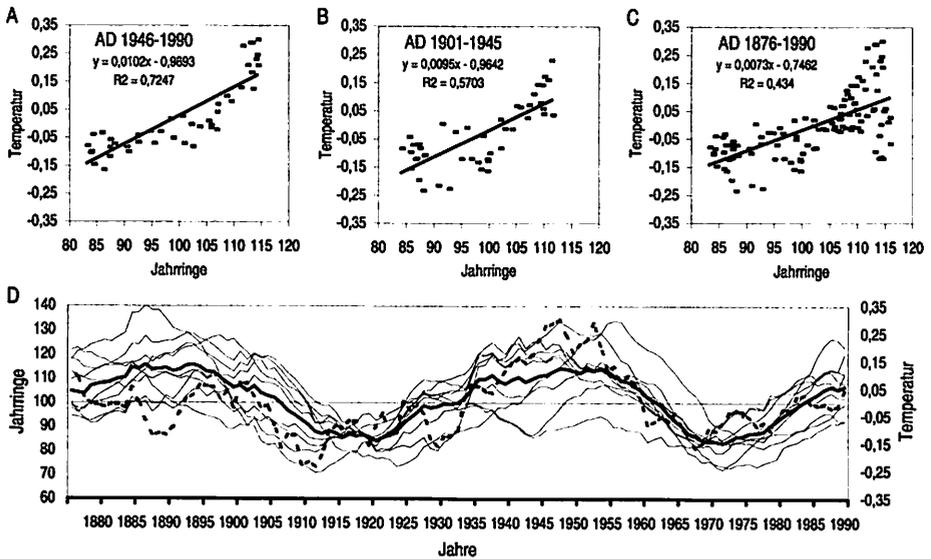


Fig. 31: Regression Jahringbreite (PakHoch) zu Jahrestemperaturen von Mean6 (15-jährige Filter)  
**A, B, C**: Lineare Regressionen in verschiedenen Zeitscheiben **D**: dünne Linien = neun 8d-Standard-  
 chronologien, dicke Linie = Mittelkurve (PakHoch), unterbrochene Linie = Jahrestemperaturen von Mean6

zusammen liegen. Ein signifikant geringerer Zusammenhang wird indes in den ältesten Jahrgängen vor AD 1900 deutlich, wodurch das reduzierte Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,434$  der gesamten Zeitscheibe AD 1876 bis 1990 in Figur 31 C erklärt wird.

Eine entsprechende Regression, die allein auf den Daten des 19. Jh.s basiert, belegt diesen visuellen Befund. Zwischen den Wertepaaren vor AD 1900 besteht keine Abhängigkeit mehr. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, daß (i) die Wahrscheinlichkeit für Meßfehler und Inhomogenitäten in den älteren Jahrgängen der Temperaturmessung zunimmt und (ii) vor AD 1900 weniger Einzelstationen zur regionalen Klimareihe Mean6 (D: gestrichelte Linie) beigetragen haben (vgl. Kap. 3.2). Allerdings ist auffällig, daß die Temperaturaufzeichnungen vor AD 1915 fast ausschließlich niedrigere Werte anzeigen als die Jahringbreiten von PakHoch (D: dicke geschlossene Linie). Diese systematische Unterschreitung der Temperaturen ist in der Punktwolke (C) rechts unterhalb der Regressionsgerade zu erkennen. Auf diesen Sachverhalt wird später noch einmal eingegangen.

Die Diagramme A und B beweisen, daß in beiden „Hälften“ des 20. Jh.s. die Abhängigkeit des Wachstums von  $T_{(a)}$  nicht unter  $R^2 = 0,57$  sinkt. Auch wenn die „schlechteren“ Wertepaare des 19. Jh.s hinzugezogen werden (C), ist der lineare Zusammenhang noch immer eindeutig. In Anbetracht der An-

zahl von Wertepaaren, die ja in C am größten ist, wird dieses Modell favorisiert. Die Zeitscheiben A und B können als unabhängige Kalibrations- bzw. Verifikationsschritte aufgefaßt werden.

Die Geradengleichung  $y = 0,0073x - 0,7462$  der linearen Regression von AD 1876 bis 1990 dient als Transfermodell. Werden die gefilterten Jahrringvariationen eingesetzt, können mit einer Wahrscheinlichkeit von  $R^2 = 0,434$  mittelfristige Temperaturschwankungen seit AD 790 rekonstruiert werden (Fig. 32). Als hell- und dunkelgraue Flächen sind die Über- und Unterschreitungen der mittleren Temperatur der letzten 1201 Jahre im NW-Karakorum dargestellt. In der Figur oben sind die ursprünglichen Jahrringindizes abgetragen, die nach dem Transfer in Temperaturvariationen umgerechnet werden. Demnach fanden alle Temperaturschwankungen in einer Amplitude von  $-0,2$  bis  $+0,2$  °C statt. Als dunkle Linie ist in den jüngsten Abschnitten die Temperaturkurve von Mean6 beigefügt, von der das Modell abgeleitet wurde.

Die Kurven- bzw. Flächendiskussion orientiert sich an den Ausführungen in den Kapiteln 4.2 und 4.3, in denen die mittelfristigen Wachstumsvariationen ausführlich besprochen sind. Danach können Dekaden unterschieden werden, in denen die mittlere Temperatur deutlich über- und unterschritten wird. Zwischen AD 1325 und 1575 sowie zwischen AD 975 und 1140 ist die Amplitude reduziert. Hier überschreiten die Temperaturschwankungen den Bereich von  $-0,1$  bis  $+0,1$  nicht. In allen anderen Zeitabschnitten ist ein mehr oder weniger harmonischer Wechsel zwischen kalten und warmen Phasen zu erkennen, die von der Amplitude her recht ausgeglichen wirken.<sup>46</sup>

Zwei statistische Besonderheiten müssen berücksichtigt werden: (i) Die rekonstruierte Amplitude der Temperaturschwankungen ist abhängig von der Transferfunktion, oder genauer von der entsprechenden Geradengleichung. (ii) Die angesprochene systematische Unterschreitung von  $T_{(a)}$  in den älteren Jahrgängen vor AD 1915 ist in den Zuwächsen der Wacholder archiviert. Jedoch wurden die säkularen Trends durch die gewählte  $\delta d$ -Indexierung (vgl. Kap. 2.1: Division durch 101-jährige gleitende Mittelwerte) eliminiert.

---

<sup>46</sup> Eine Spektralanalyse mit MESA (Maximum Entropie Spektral Analyse) ergibt, daß ein Zyklus der Frequenz von 8 Jahren in der 1201-jährigen Chronologie PakHoch von Standorten nahe der oberen Waldgrenze im NW-Karakorum enthalten ist. Sekundäre Maxima im normierten Spektrum treten bei 11 Jahren, 35 Jahren und 48 Jahren auf. Die 11-jährige Frequenz legt nahe, daß zumindest Anteile an den Jahrringbreitenvariationen auf das systematische solare Signal der Sonnenflecken zurückgeführt werden könnten. Eine umfassende Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Proxi und den sogenannten „Forcing Factors“ ist in Vorbereitung.

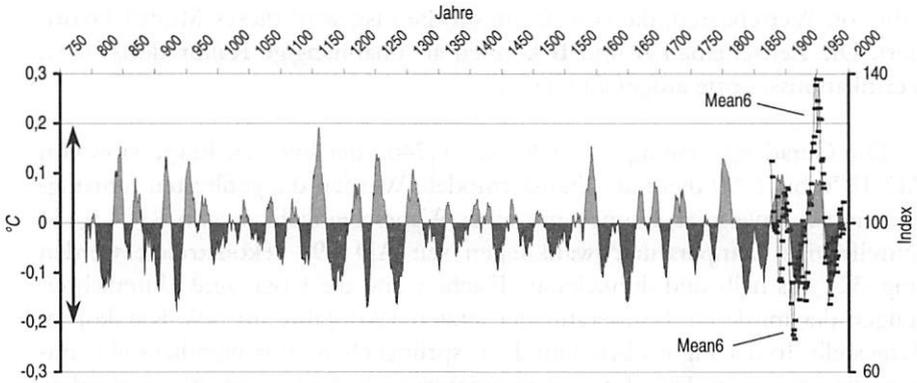


Fig. 32: Temperaturrekonstruktion seit AD 790 (Transfer: AD 1876-1990), Hochlagen Pakistan

Der erstgenannte Aspekt (i) kommt durch den Vergleich der Regressionsgeraden in **A**, **B** und **C** (Fig. 31) zum Ausdruck. Die Multiplikatoren für  $x$  betragen 0,0102 (in **A**), 0,0095 (in **B**) und 0,0073 (in **C**). Diese Differenzen werden durch die unterschiedliche Amplitude von Mean6 in den verschiedenen Zeitfenstern verursacht. Würde man statt der Variante **C** die Gleichung aus **B** oder gar aus **A** verwenden, fiel die rekonstruierte Temperaturamplitude größer aus. In keinem Fall überschreitet sie jedoch die Spannweite von -0,3 bis +0,3°C.

Die Unterschreitung von  $T_{(a)}$  in den älteren Jahrgängen von Mean6 (ii), die als positive Gesamtklination in den Temperaturdaten aufgefaßt werden kann, führt zur Berücksichtigung der in Kapitel 4.4 diskutierten säkularen Trends in den Jahringbreiten. Die Auswertung der 1000-jährigen Wacholder ergab, daß auch in den Baumdaten eine positive Inklination nach AD 1876 (= Zeitscheibe von Mean6) archiviert ist (vgl. Fig. 22). Allerdings wurde diese bei der Betonung der mittelfristigen Wachstumsvariationen durch die Berechnung von  $8d$ -Indizes unterdrückt. Anders formuliert, paßt die systematische Unterschreitung in den älteren Jahrgängen ausgezeichnet in das Gesamtbild, das von den Baumzuwachsen ausgeht. Wenn also das Low-Frequency Signal auf die säkularen Trends „aufgepflanzt“ wird, wie es in Figur 33 geschehen ist, nähern sich die langfristigen Trends der mittelfristigen Variationen der Jahringbreite (= Temperaturrekonstruktion) und der gemessenen Temperatur von Mean6 an. In Figur 32 kann man den Unterschied zwischen den beiden Datensätzen (Mean6-Kurve und rekonstruierte Temperaturflächen) noch deutlich erkennen.

Figur 33 kombiniert alle wesentlichen klimatischen Befunde dieser Studie seit AD 618 im westlichen Zentralasien. Zusammengefaßt sind die säkularen

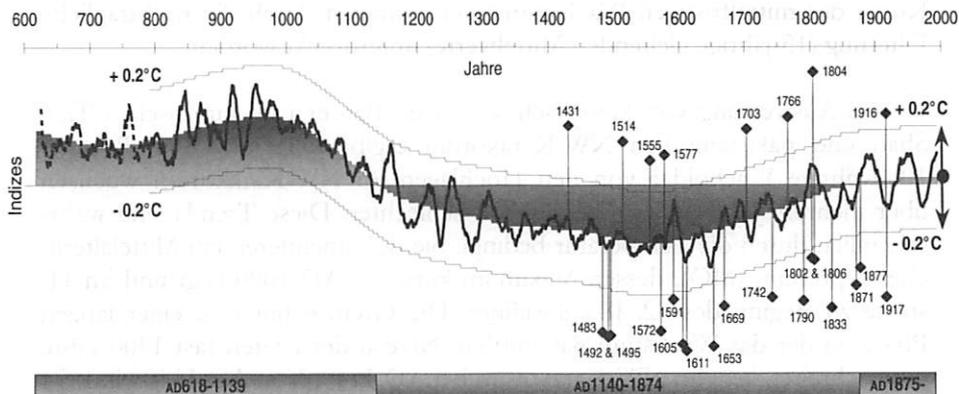


Fig. 33: "Klimaevents" (säkulare Trends, mittelfristige Variationen und überregionale Weiserjahre) im westlichen Zentralasien seit AD 618

Trends (vgl. Kap. 4.4, Fig. 22), die überregionalen, zwischen Pakistan und Kirgistan deckungsgleichen Weiserjahre (vgl. Kap. 5.1, Tab. 8) und das Low-Frequency Signal der Hochlagenstandorte in Pakistan (vgl. Kap. 4.3, z.B. Fig. 17). Die eingetragene Temperaturamplitude von  $-0,2$  bis  $+0,2^{\circ}\text{C}$  bezieht sich ausschließlich auf die mittelfristigen Wachstumsvariationen in PakHoch (durchgezogene Linie). In den ältesten Abschnitten vor AD 790 ist als gestrichelte Linie das Low-Frequency Signal der 1000-jährigen Wacholder eingezeichnet.

Wesentlich für das Verständnis dieser Figur ist, daß die einzelnen Kurven, Flächen und Punkte *nicht* proportional zueinander sind! So kann beispielsweise die Amplitude der mittelfristigen Wachstumszunahme um AD 1800 zwar mit dem sekundären Optimum in der Mitte des 19 Jh.s verglichen werden (durchgezogene Linie), allerdings sind die Amplituden zwischen dieser Kurve und den grauen Flächen nicht vergleichbar. Anders ausgedrückt, ist nicht bewiesen, ob das gefilterte Low-Frequency Signal bzw. die Temperaturen in der dargestellten Form zwischen AD 1140 und 1874 unter den Gesamtmittelwert seit AD 618 absinken. Sicher hingegen ist, daß die mittelfristigen Variationen dem langfristigen Trend folgen müssen, denn bei der Berechnung der Hochlagenchronologie PakHoch sind sie eliminiert worden (vgl. Kap. 4.4., Fig. 20).

Ebenso ist die Amplitude der Extremjahre mehr oder weniger frei gewählt. Allerdings ist wahrscheinlich, daß Einzeljahre z.B. in der langfristigen Depression zwischen AD 1140 und 1874 immer wieder das Niveau vor der Jahrtausendwende oder im 20 Jh. erreichen. Diese Einzeljahre sind ja in der

Kurve der mittelfristigen Wachstumsschwankungen durch die nachträgliche Filterung (15-jährige gleitenden Mittelwerte) unterdrückt worden.

Die Auswertung von klimatisch sensitiven Bäumen im kirgisischen Tien Shan und pakistanischen NW-Karakorum ergibt folgendes Bild: Rezente 1000-jährige Wacholder von den Hochlagen im NW-Karakorum wuchsen über mehrere Jahrhunderte besser und schlechter. Diese Trends sind wahrscheinlich durch die Temperatur bedingt. Sie dokumentieren ein Mittelalterliches Optimum (MO), dessen Maximum kurz vor AD 1000 liegt und im 11. sowie zu Beginn des 12. Jh.s ausklingt. Die Grenzziehung zu einer langen Phase, in der das Wachstum das mittlere Niveau der letzten fast 1400 Jahre unterschreitet, liegt im NW-Karakorum bei AD 1140. Von AD 1140 bis 1874 ist eine lange Depression dokumentiert, in deren Bereich die kleine Eiszeit (LIA) fällt. Das 16. Jh. war in den Northern Areas of Pakistan wahrscheinlich die kälteste Periode seit AD 618. Seit dem 17. Jh. nehmen die Jahrringbreiten zu und überschreiten AD 1875 das mittlere Niveau der letzten 1373 Jahre. Im viel diskutierten Zeitfenster seit Mitte des 19 Jh.s ist ein Anstieg zu immer besseren Wachstumsbedingungen abgebildet, wobei im 20 Jh. bei weitem nicht das Niveau des Mittelalterlichen Optimums erreicht wird.

Entlang dieser säkularen Trends finden mittelfristige Temperaturschwankungen der Amplitude  $+0,2$  bis  $-0,2^{\circ}\text{C}$  statt. Deutlich wärmere Phasen, wie um AD 1800, können unterschieden werden von kälteren, wie um AD 1830. Diese Schwankungen resultieren aus synchronen Wachstumsvariationen nahe der oberen Waldgrenze im NW-Karakorum. Ein Vergleich mit den kirgisischen Hochlagenstandorten seit AD 1258 (Kap. 4.4, Fig. 18) ergab, daß die Schwankungen im Tien Shan in vielen Teilen ähnlich denen im NW-Karakorum sind. Somit besitzen auch die rekonstruierten Temperaturen mit einiger Wahrscheinlichkeit überregionale Bedeutung. Deshalb scheint die Beschriftung der Figur 33 „Klimaevents im westlichen Zentralasien seit AD 618“ gerechtfertigt.

Die gleiche Überlegung trifft auf die eingetragenen Extremjahre zu. Dargestellt sind die überregionalen Weiserjahre, die sich an allen Standorten im NW-Karakorum *und* dem Tien Shan durchsetzen. Es sei noch einmal daran erinnert, daß von den negativen Extremjahren ein größeres Erklärungspotential ausgeht. Sie sind an den verschiedenen Standorten synchroner und setzen sich insgesamt häufiger durch (vgl. Kap. 5.1). Die Untersuchung der klimatischen Limitierung ergab, daß in Einzelfällen sowohl die Temperatur als auch der Niederschlag extreme Wachstumsreaktionen auslösen können (vgl. Kap. 5.2).

## 7 DISKUSSION

Die standörtliche Differenzierung der untersuchten Bestände nach Exposition, horizontalen und vor allem vertikalen Gradienten der Temperatur und des Niederschlags spielt bei der Ausbildung breiter und schmaler Jahrringe im NW-Karakorum und dem Tien Shan eine untergeordnete Rolle. Die einzelnen Zuwachskurven sind meist derart synchron, daß die Herausstellung besonderer Wachstumsmuster, die nur an einem oder mehreren Standorten Gültigkeit haben, schwer ist. Diese Erkenntnis steht im krassen Widerspruch zu den Hypothesen, die ausschlaggebend für die Beprobungsstrategie waren. Beispielsweise können Signale von der unteren Waldgrenze nicht ohne weiteres von denen nahe der oberen Waldgrenze unterschieden werden, wie es LA MARCHE (1974) an *Bristlecone pine* aus dem SW der U.S.A. gezeigt hat. Hochlagenstandorte und Tieflagenstandorte sind vergleichbar sensitiv und reagieren sehr ähnlich.

Auch wenn die Extremjahranalyse die Bedeutung des Niederschlags in einzelnen Jahren belegt und in diesem Zusammenhang die Rolle der klimatisch-ökologischen Gradienten in den Untersuchungsräumen bei der Wachstumslimitierung betont, so bleibt doch die Dominanz der Temperaturen auf die kambiiale Aktivität an fast allen Standorten. Dieser Zusammenhang wird durch die kontinuierliche Zeitreihenanalyse verifiziert. Diese Vorbemerkungen sind die Grundlage für die Einordnung und Evaluierung der Resultate der vorliegenden Untersuchung.

Die Diskussion der klimatologischen Befunde orientiert sich an der Separierung in verschiedene Wellenlängen. Die bedeutenden Frequenzen des Baumwachstums in den zentralasiatischen Hochgebirgen Karakorum und Tien Shan sind (i) säkulare Trends, (ii) mittelfristige Wachstumsvariationen und (iii) singuläre Extremjahre.

Zuwachszunahmen und Zuwachsreduktionen über mehrere Jahrhunderte (i) können an 1000-jährigen Wachholdern nahe der oberen Waldgrenze im NW-Karakorum nachgewiesen werden. Dieses Very-Low-Frequency Signal ist zeitlich stabil, d.h., die Streuung der Einzelerien variiert nur geringfügig in den verschiedenen Jahrhunderten. Vergleichbare Ergebnisse sind in Zentralasien auch von anderen Proxidaten selten, weshalb sich eine Diskussion dieser Wellenlänge auf globaler oder zumindest nordhemisphärischer Ebene anbietet.

Das am besten abgesicherte Signal sind die mittelfristigen Wachstumsschwankungen in Dekadenlänge (ii). Low-Frequency Variationen sind innerhalb und zwischen zahlreichen Standorten äußerst synchron. Auch die entsprechende Kalibration, Verifikation und Rekonstruktion auf Grundlage die-

ser Wellenlänge erscheint gut abgesichert. Mittelfristige Wachstumsschwankungen nahe der oberen Waldgrenze im NW-Karakorum reflektieren Temperaturschwankungen seit AD 790. Wegen der Ähnlichkeit des Wachstums an den Hochlagen Pakistans und Kirgistans besitzt dieses Ergebnis überregionale Bedeutung und kann mit einiger Wahrscheinlichkeit auf das gesamte westliche Zentralasien übertragen werden. Eine vergleichende Diskussion mit Resultaten aus anderen Studien sollte die Bedeutung der Temperaturrekonstruktion mit Wachholdern auf eine breitere Basis stellen. Dazu werden Arbeiten aus dem zentralasiatischen Raum und Beispiele aus der Nordhemisphäre herangezogen.

Schließlich mündet die Auswertung interannueller Variationen in die Rekonstruktion überregionaler Extremjahre (iii), die sich an den kirgisischen *und* pakistanischen Baumstandorten durchsetzen. Extrem schmale und breite Jahrringe sind die markanten Eckpfeiler beim Aufbau langer Chronologien. Sie prägen die Jahrringsequenzen und sind zwischen den einzelnen Bäumen eines Standorts und zwischen den verschiedenen Standorten synchron. Vergleiche mit meteorologischen Meßreihen zeigen, daß extreme Jahrringbreitenvariationen in dieser Frequenz auf unterschiedliche klimatische Konstellationen zurückzuführen sind. Somit wird das Wesen der Proxidata, die immer nur stellvertretend für Klimatelemente stehen können, belegt. Die Dendroklimatologie ist nach den vorliegenden Resultaten gut beraten, zunächst einzelne Extremjahre im Leben der Bäume zu erklären, bevor mit kontinuierlichen Ansätzen die Bedeutung nur eines Klimatelements überschätzt wird. Überregionale Extremjahre, also Weiserjahre, die im Tien Shan und Karakorum deckungsgleich sind, werden in der Diskussion mit Temperaturweiserjahren aus Dichtechronologien der gesamten Nordhemisphäre verglichen.

Die rezente Erwärmung der Atmosphäre seit ca. Mitte des letzten Jahrhunderts wird in unzähligen Beiträgen festgestellt. Stellvertretend sei auf die zusammenfassenden Darstellungen des IPCC (1990, 1996) verwiesen. Diese Dynamik ist ein globales Phänomen, daß durch direkte Messungen der Klimatelemente weltweit abgesichert wird. Allerdings sind auch weiter zurück liegende, äußerst niederfrequente Klimaschwankungen in regionalen Arbeiten vergleichsweise gut dokumentiert (Zusammenfassung z.B. in FLOHN 1988). Schließlich hat sich für die letzte, mehrere Jahrhunderte andauernde Klimadepression der Begriff „Kleine Eiszeit“ (Little Ice Age, LIA) etabliert. Die vorhergehende, entgegengesetzte Klimaepoche ist als „Mittelalterliches Optimum“ (MO) in die Literatur eingegangen. KAENNEL et al. (1995) berücksichtigen unzählige Arbeiten für die Abgrenzung des LIA und geben für Europa schließlich den Zeitraum „ungefähr“ vom 13. bis ins 19. Jh. an. Die zeitliche Fixierung des MO ist noch unschärfer. Sicher ist, daß irgendwann zwi-

schen AD 900 und 1300 die Temperaturen in Europa und angrenzenden Gebieten deutlich erhöht waren. LAMB (1977, 1982) gibt für das MO den Zeitraum AD 1150 bis 1300 an, während andere Arbeiten (vgl. FLOHN 1988) die Erwärmung z.T. früher ansetzen. Zumindest für den europäischen Raum steht fest, daß das MO wärmer war als die wärmste Dekade des 20. Jh.s. Die kältesten Dekaden der letzten 1200 Jahre werden im 17. Jh. rekonstruiert (FLOHN 1988).

Alle drei „Klimaepochen“, MO, LIA und rezente Erwärmung werden in der vorliegenden Studie bestätigt. Säkulare Trends im Zuwachs 1000-jähriger Wacholder an Standorten nahe der oberen Waldgrenze im NW-Karakorum folgen diesen niederfrequenten Schwankungen und dokumentieren, daß sie für den westlichen zentralasiatischen Raum Gültigkeit haben. Die Bäume belegen, daß die Wachstumsbedingungen vor AD 1000 besser waren als in allen anderen Zeiten der letzten fast 1400 Jahre, daß die jährlichen Zuwächse im 16. Jh. minimal waren und danach zunehmend breitere Jahrringe angelegt wurden. Dabei erreichen die jüngsten Jahrringe bei weitem nicht das Niveau während des MO.

Zu den am besten untersuchten Proxidatenquellen weltweit zählen der Große Aletsch und der Gorner Gletscher in den schweizerischen Alpen. Ein Vergleich zwischen den Fluktuationen des Gorner Gletschers und den säkularen Trends der Wacholder belegt die Parallelen der maßgeblichen „Klimaevents“ in dem europäischen und zentralasiatischen Hochgebirge. HOLZHAUSER (1997) entwirft aus der Kombination glazialgeomorphologischer Befunde mit <sup>14</sup>C-Datierungen fossiler Hölzer und Böden sowie dendrochronologischer Untersuchungen an fossilen Lärchen aus den Gletschervorfeldern ein präzises Bild von den Eisrandlagen in den angesprochenen letzten drei Klimaepochen: MO, LIA und rezente Erwärmung (HOLZHAUSER 1997:38). Er datiert einzelne Vorstöße und kann ebenso die dem LIA vorangegangene Klimagunstphase, das MO zeitlich eingrenzen (8. Jh. bis Ende 13. Jh.). Spezifische Reaktionszeiten auf Klimaverschlechterungen und -verbesserungen in Relation zur Gletschergröße, die Problematik der Schuttbedeckung oder unterschiedlicher Neigungen im Nähr- und Zehrgebiet usw. sollen hier nicht diskutiert werden. Allerdings verschwimmen potentielle Probleme beim Vergleich verschiedener Proxidatenquellen, wenn eine derart lange Frequenz fokussiert wird. Die Alpengletscher stießen über längere Zeiträume vor oder waren stationär; die Karakorum-Wacholder verhielten sich über mehrere Jahrhunderte entsprechend den forcierenden Klimabedingungen gleich.

Eine vergleichende Diskussion der Temperaturrekonstruktion seit AD 790, die aus mittelfristigen Wachstumsvariationen von Bäumen nahe der obo-

ren Waldgrenze resultiert, ist ungleich schwieriger. Von dieser Wellenlänge existieren unzählige regionale Befunde, die sich zumindest teilweise widersprechen. Eine umfassende Darstellung der aktuellen Literatur ist sicher nicht Aufgabe der vorliegenden Studie. Hier ist das erklärte Ziel, aussagekräftige Temperaturoptima und -depressionen mit anderen Ergebnissen aus Zentralasien zu vergleichen und über den „Tellerrand“ hinaus zu diskutieren, was in besser untersuchten Räumen der Nordhemisphäre gültig ist.

Aus dem dendroklimatologischen Blickwinkel ist der Karakorum vergleichsweise spärlich erforscht. Meist gehen die Arbeiten über initiale Untersuchungen nicht hinaus (AHMED 1989, AHMED et al. 1991, BILHAM et al. 1993, ESPER et al. 1995), weshalb regionale Vergleiche nicht sinnvoll sind. Lange und besser replizierte *Juniperus*-Chronologien sind von der oberen Waldgrenze in Kirgistan bekannt (MUKHAMEDSHIN et al. in ZHENG et al. 1982). Nach MUKHAMEDSHIN et al. wird die Jahrringbreite von *Juniperus turkestanica* Kom. im südlichen Tien Shan durch die Sommertemperaturen limitiert. Dies deckt sich mit den vorliegenden Resultaten. GRAYBILL et al. (1992) arbeiten mit *Juniperus turkestanica*, *Juniperus seravchanica* und *Juniperus semiglobosa* aus verschiedenen Höhenstufen. Die sensitivste Chronologie nahe der oberen Waldgrenze im südlichen Tien Shan (39°-50'N/71°-30'E) ist in vielen Teilen synchron mit den mittelfristigen Wachstumsvariationen, die in dieser Studie präsentiert werden. Beispielsweise werden die rekonstruierten hohen Temperaturen um AD 1800 durch breite Jahrringe, oder die Temperaturdepression um AD 1840 durch schmale Jahrringe in der Untersuchung von GRAYBILL et al. (1992) gestützt. Die Kalibration und Zuordnung der Jahrringbreitenschwankungen zu einem Klimatelement gelang mit den „Graybill-Daten“ bisher jedoch nicht, was G. Funkhouser (mündliche Mitteilung) auf die zunehmende Streuung zwischen den Einzelbäumen gegen Ende des 19. Jh. und vor allem im 20. Jh. zurückführt.

Aus Zentralasien liegen Gletscherbefunde vor, die ebenfalls mittelfristige Klimavariationen dokumentieren (HASERODT 1989, KICK 1996, SHRODER 1993). Trotz der äußerst kontrovers geführten Diskussion über die Gültigkeit einzelner Rekonstruktionen sollen hier einige dieser Resultate mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie verglichen werden. Eine Bewertung der glazialgeomorphologischen Arbeiten ist von dendrochronologischer Seite jedoch nicht zu leisten. Exemplarisch sei auf KICK (1985) verwiesen, der kritisch die Situation in Zentralasien reflektiert. Auf die methodische Problematik bei Vergleichen mit dieser Proxidataquelle wurde bereits eingegangen. Sicher müssen die teilweise erheblichen Reaktionszeiten berücksichtigt werden. Außerdem resultiert eine Gletscherfluktuation nicht allein aus Temperaturvariationen. Niederschläge üben mindestens einen vergleichbaren Einfluß auf den Massenhaushalt und die Eisrandlagen aus.

Auffällig ist, daß nur wenige Arbeiten das Verhalten zentralasiatischer Gletscher zu einer Kurve integrieren, die länger als 500 Jahre zurückreicht (RÖTHLISBERGER et al. 1985). MAYEWSKI et al. (1980) diskutieren die Dynamik von 120 Gletschern im westlichen Himalaya inklusive dem Karakorum von AD 1850 bis 1960. Sie unterscheiden zwischen den Eisströmen des Himalaya und des Transhimalaya, wobei die Gletscher des Karakorum der zweiten Gruppe angehören. Demnach wird – vergleichbar mit den Ergebnissen dieser Studie – ein genereller Rückzug seit AD 1850 festgestellt (vgl. auch OERLEMANS 1994), der allerdings im Transhimalaya durch eine scharfe Zuwachszunahme zwischen AD 1890 und 1910 unterbrochen ist. Dieses Verhalten ist wiederum nur schwer mit den Jahrringdaten in Einklang zu bringen, da vor der Jahrhundertwende eine deutliche Wachstumszunahme rekonstruiert wird. Möglicherweise driften die Proxidataquellen auseinander, weil die Agenzien unterschiedlich sind. Oder die in dieser Studie rekonstruierte Temperaturdepression bis in die 1870er Jahre hinein wirkt sich mit einer erheblichen Verzögerungszeit auf die Gletscher aus. Diese wachsen erst dann an, wenn die Temperaturen wieder deutlich erhöht sind.

In verschiedenen zentralasiatischen Untersuchungen an Gletschern ist eine – wenn auch umstrittene (KICK 1985) – Vorstoßphase um AD 1850 belegt worden (HASERODT 1989, MAYEWSKI et al. 1980, RÖTHLISBERGER et al. 1985, SHRODER 1993). Diese wird nun durch die reduzierte kambiale Aktivität seit ca. AD 1830 an fast allen Baumstandorten in Pakistan und Kirgistan bestätigt, die eine Temperaturdepression reflektiert.

Das Gletschermaximum Mitte des letzten Jahrhunderts ist in den intensiver untersuchten Hochgebirgen Nordamerikas und Europas besser abgesichert (Zusammenfassung z.B. in FLOHN 1988). Dieses globale Signal legt zumindest für die jüngste Zeitscheibe die Richtigkeit der hier präsentierten Temperaturrekonstruktion nahe. Allerdings sind vor allem die älteren Variationen (heute noch) schwierig zu bestätigen. Es existieren zu viele und zu widersprüchliche Befunde, die wahrscheinlich den regionalen Charakter einzelner Studien reflektieren. Somit wird die Temperaturrekonstruktion seit AD 790 zur Diskussion gestellt, an der sich zukünftige Untersuchungen im zentralasiatischen Raum orientieren können. Möglicherweise werden Teile der Rekonstruktion oder die Amplitude der Temperaturen durch weitere dendroklimatologische Arbeiten oder die Auswertung anderer Proxidataquellen verifiziert oder es kommt zu einer kontroversen Diskussion, in der die räumliche Gültigkeit der vorliegenden Resultate eingegrenzt oder gar die Richtigkeit einzelner Optima und Depressionen in Frage gestellt wird. Die jüngeren Temperaturschwankungen seit dem 19. Jh. haben mit Sicherheit mehr als nur regionale Bedeutung.

Die systematische Analyse von Extremjahren im Baumwachstum, die sowohl in der kirgisischen als auch der pakistanischen Untersuchungsregion ausgebildet sind, demnach als überregionale Weiserjahre bezeichnet werden, wird einem der besten bekannten Datenarchive der Nordhemisphäre gegenübergestellt, den Temperaturweiserjahren aus Dichtechronologien von Nordamerika, Europa und dem nördlichen Asien (BRIFFA et al. 1998a). Dieses Netzwerk aus 380 Chronologien der maximalen Spätholzdichte gilt als einmalige Proxidatenquelle für Spätsommertemperaturen in den nördlichen hohen Breiten und der Nordhemisphäre insgesamt. BRIFFA et al. (1998a) belegen den Einfluß großer vulkanischer Eruptionen auf die Sommertemperaturen in den letzten 600 Jahren. Anhand der rekonstruierten Temperatureinbrüche in einzelnen Regionen können sie die räumliche Verteilung von Aerosolwolken nachvollziehen.

Ein Vergleich der Liste markanter Weiserjahre aus den Dichtechronologien mit den 17 rekonstruierten negativen Extremjahren aus dem Tien Shan und dem Karakorum seit AD 1427 zeigt, daß fast keine Übereinstimmungen existieren. Somit liegt auch der Schluß nahe, daß keine Bezüge zu den untersuchten Vulkanausbrüchen bestehen. Beispielsweise löste die stärkste Temperaturreduktion der letzten 600 Jahre, AD 1601, die im Zusammenhang mit der Eruption des Huaynaputina, Peru, im Jahre 1600 steht, an den in dieser Studie untersuchten Standorten keine nennenswerten Reaktionen aus. Von den insgesamt 30 diskutierten stärksten Temperatureinbrüchen auf der Nordhemisphäre (BRIFFA et al. 1998a) sind lediglich die Jahre AD 1495, 1669 und 1742 negative überregionale Weiserjahre (der Jahrringbreite) im westlichen Zentralasien.

Auch wenn die Autoren von einem Datensatz sprechen, der für die gesamte Nordhemisphäre Gültigkeit besitzt, so kommen viele Chronologien doch von Standorten entlang der nordischen Waldgrenze aus hohen Breiten. Somit liegt der Schluß nahe, daß die in dieser Studie rekonstruierten Extremjahre bei Deckungsgleichheit in den Untersuchungsregionen zwar als überregional zu bezeichnen sind. Zweifellos ist aber die Ausprägung auffallend schmaler Jahrringe im räumlichen synoptisch-klimatologischen Kontext zu sehen. Zeitgleiche negative Extremreaktionen sowohl im randlich monsunal beeinflussten NW-Karakorum als auch im kontinentalen Tien Shan können durch großräumige Temperaturdepressionen ausgelöst werden (z.B. AD 1917). Allerdings scheinen derartige Ereignisse auf die Hochgebirge begrenzt zu sein und sind nicht ohne weiteres auf Regionen in den hohen Breiten übertragbar.

Methodisch ist zu bedenken, daß keine der zum Vergleich herangezogenen Dichtechronologien auf Untersuchungen von Wacholderbäumen gestützt sind und ferner der untersuchte Parameter – die maximale Spätholz-

dichte – sich qualitativ von der Jahrringbreite unterscheidet. Die Extremjahranalyse hat indes gezeigt, daß jüngere Weiserjahre der Jahrringbreite durch unterschiedliche meteorologische Konstellationen erklärt werden müssen, weshalb der Vergleich mit anderen Proxidatenquellen, die ja alle in der Hauptsache auf ein bestimmtes Klimaelement transferiert werden, grundsätzlich schwierig ist.

Obwohl diese Einschränkungen die Vergleichbarkeit reduzieren, bleiben die Aussagen zur räumlichen Ausdehnung der vorliegenden Befunde evident: Überregionale Weiserjahre im westlichen Zentralasien sind Extremjahre, die aufgrund deckungsgleicher Reaktionen an vielen Standorten des Karakorum und Tien Shan klimatische Bedeutung haben. Allerdings ist die Aussagekraft sowohl räumlich als auch inhaltlich (Klimaelemente) eingeschränkt. Vom Autor wird der Aufbau eines zentralasiatischen Netzwerks von Weiserjahren empfohlen, an dem sich Gruppen beteiligen sollten, die z.B. in Nepal (E.R. Cook/P. Krusic und B. Schmidt), Tibet (A. Bräuning) und der Mongolei (U. Treter) aktiv sind. Möglich wäre eine einheitliche, genormte Bearbeitung bestehender Chronologien zur Extraktion von Weiserjahren, die dann von der statistischen Seite aus ohne Einschränkung vergleichbar wären.

Von den in dieser Studie rekonstruierten Wellenlängen, den säkularen Trends, den mittelfristigen Temperaturvariationen und den singulären Extremjahren geht eine unterschiedliche Bedeutung aus. Die Wachstumsvariationen über mehrere Jahrhunderte (Very-Low-Frequency Signal) passen ausgezeichnet in die wahrscheinlich global gültige Einteilung in MO, LIA und rezente Erwärmung. Auch wenn die Amplitude dieses Signals nicht kalibriert werden kann, liegt es aufgrund der bekannten Zusammenhänge (vgl. z.B. FLOHN 1988) nahe, daß säkulare Trends von 1000-jährigen Wachholdern im NW-Karakorum Temperaturvariationen reflektieren. Im Vergleich dazu ist die Kalibration des Low-Frequency Signals gelungen, wobei zumindest die jüngeren Temperaturfluktuationen durch Befunde anderer Untersuchungen abgesichert werden. Die räumliche Gültigkeit des Low-Frequency Signals seit AD 790 scheint gegenüber den säkularen Trends eingeschränkt zu sein. Allerdings sind Vergleiche mit anderen Arbeiten aufgrund der Fülle an regionalen Ergebnissen problematischer. Von den rekonstruierten Extremjahren im Baumwachstum geht schließlich die geringste räumliche Gültigkeit aus. Aufgrund der unterschiedlichen klimatischen Argumentation, die für einzelne Weiserjahre der Jahrringbreite notwendig ist, sind Vergleiche mit anderen Rekonstruktionen bestimmter Klimaelemente schwierig.

## 8 ZUSAMMENFASSUNG

Um einen Beitrag zur Paläoklimaforschung in Zentralasien zu leisten, werden weit mehr als 200.000 Jahrringe<sup>47</sup> von rezenten Bäumen aus dem pakistanischen NW-Karakorum und dem kirgisischen Tien Shan (Alaikette) ausgewertet. Grundlage sind überwiegend Wacholder der Arten *Juniperus excelsa* Bieb., *Juniperus turkestanica* Kom., *Juniperus semiglobosa* Regel und *Juniperus seravchanica* Komarov., die durch einige *Picea smithiana* (Wallich) Boiss. und *Pinus wallichiana* A.B. Jackson aus dem Bagrot Tal im pakistanischen Hunza-Karakorum ergänzt werden. Ein Vergleich der verschiedenen, in den Untersuchungsregionen systematisch verteilten Wacholder ergibt, daß keine artspezifische Sensitivität vorliegt. Holzanatomisch sind die *Juniperi* identisch.

Die Untersuchungsregion im NW-Karakorum (74°-76°E/35°-37°N) liegt im Übergangsbereich vom semihumiden, monsunal geprägten Himalayavorland zu den nördlich anschließenden kontinentalen Steppen an der Schnittstelle zwischen Monsunzirkulation und Westwinddrift. Die kontinentalen Standorte im südlichen Tien Shan (72°35'E/40°10'N) sind mehr als 500 km entfernt, getrennt durch die Karakorumhauptkette, den westlichen Hindukusch und den Pamir. Somit sind in beiden Hochgebirgen – NW-Karakorum und Alaikette des Tien Shan – vollkommen unterschiedliche Großwetterlagen wirksam, die das regionale Klima determinieren und Einfluß auf das Baumwachstum ausüben.

Die Beprobungsstrategie orientiert sich an den naturräumlichen Gegebenheiten in den zentralasiatischen Hochgebirgen. Sowohl im NW-Karakorum als auch dem Tien Shan sind scharfe Expositionsunterschiede und steile vertikale Gradienten der Temperatur und des Niederschlags ausgeprägt. Somit besteht auf vergleichsweise geringen Distanzen die Möglichkeit, die klimatisch-ökologischen Unterschiede zwischen einzelnen Untersuchungsflächen zu maximieren. Diese Überlegung orientiert sich an bekannten Arbeitsweisen in der Dendroklimatologie (LA MARCHE 1974, SCHWEINGRUBER 1996), nach denen von feuchten, kühlen Standorten grundsätzlich andere Wachstumsreaktionen zu erwarten sind als von trockenen und warmen. In drei Feldkampagnen wurden insgesamt 23 phytosoziologisch homogene Plots mit meist mehr als 15 Bäumen entlang unterschiedlich exponierter Transekte beprobt.

---

<sup>47</sup> Diese Angabe bezieht sich auf alle gemessenen Jahrringe (Bohrkerne). Grundlage für alle Berechnungen sind Baummittelkurven, wenn mehrere Bohrproben eines Baums zusammengefaßt werden. Dieser Datenpool umfaßt noch 148.684 Jahrringe, wovon 103.907 an pakistanischen und 44.777 an kirgisischen Bäumen gemessen wurden.

Da im Hunza-Karakorum neben der Expositionsdifferenzierung und Höhenstufung ein synoptischer horizontaler Niederschlaggradient die Verteilung der Waldbestände und Baumarten beeinflusst, wurden Täler aufgesucht, die entlang dieser „Variablen“ orientiert sind (Bagrot, Chaprot, Morkhun). Schließlich dienen drei Untersuchungsflächen im ca. 120 km südöstlich vorgelagerten Satpara Tal als Vergleichsstandorte, an denen die räumliche Verbreitung der Signale aus dem Hunza-Karakorum überprüft werden kann. Aus dem Tien Shan fließen ausschließlich Wacholderbestände des Karagui Tals im südlichen Kirgistan in die Studie ein.

Um den umfangreichen Datensatz sinnvoll zu aggregieren und einer paläoklimatischen Argumentation zuzuführen, werden fast ausschließlich bekannte dendrochronologische Methoden eingesetzt, die in einschlägigen Monographien, wie FRITTS (1976) oder COOK et al. (1992c) beschrieben sind. Dies betrifft die Verfahren der Indexierung, die Evaluierung von Extremjahren sowie die Kalibration, Verifikation und Rekonstruktion. Im wesentlichen geht es darum, aus den unspezifischen Jahrringbreiten Aussagen über bzw. Transfers zu Klimaelementen zu erzielen. Für die Quantifizierung der Homogenität oder Streuung der Jahrringsequenzen werden einfache statistische Parameter, wie die Standardabweichung, der Variationskoeffizient oder die Gleichläufigkeit (GLK) verwendet. Der Schwerpunkt der vorliegenden Studie liegt bei den inhaltlichen Aussagen zu vergangenen Klimazuständen im westlichen Zentralasien.

Die Phänologie der Wacholder ist durch Anpassungsstrategien an die strahlungsintensiven, windexponierten und insgesamt kargen Standorte geprägt. *Juniperus excelsa*, *J. turkestanica*, *J. semiglobosa* und *J. seravchanica* sind vom Habitus her ähnlich. Sie bilden charakteristische spannrückige Stammquerschnitte mit „strip bark formation“ (FERGUSON 1968, FRITTS 1969, WRIGHT et al. 1965). Typische Jahrringmerkmale sind Dichteschwankungen, „Missing Rings“, Perioden enger, nicht mehr zählbarer Jahrringe sowie Haselwuchs.

Die beobachteten Wachstumsgeschwindigkeiten und Baumalter spiegeln die Umweltbedingungen bzw. die Wirksamkeit der limitierenden Faktoren an den einzelnen Standorten wider. Die ältesten Bäume (*Juniperus turkestanica* Kom.) mit den engsten Jahrringen wachsen nahe der oberen Waldgrenze in den trockenen pakistanischen Tälern Morkhun und Satpara (z.B. Mor3: Bäume = 20, mittleres Alter = 632 Jahre, mittleres Wachstum = 0,33 mm; Sat2: Bäume = 18, mittleres Alter = 755 Jahre, mittleres Wachstum = 0,28 mm). Die längste Einzelerie reicht bis AD 388 zurück, wobei noch ca. 200 weitere Jahrringe durch eine Fäulnis von der Sequenz abgetrennt sind. Hier handelt

es sich sehr wahrscheinlich um einen mehr als 2000 Jahre alten *Juniperus turkestanica*. Von den beprobten *Juniperi* im kirgisischen Karagai Tal ist hingegen keiner älter als 900 Jahre. Trotz zunehmender Trockenheit wachsen dominante und subdominante Wacholder nahe der unteren lokalen Waldgrenzen aufgrund des Wärmeüberschusses deutlich schneller und sind meist nicht älter als 300 Jahre, in Einzelfällen gar 150 Jahre. Die feuchten Mischbestände mit *Picea smithiana* (Wallich) Boiss. und *Pinus wallichiana* A.B. Jackson im N-exponierten Transekt des Bagrot Tals (Hunza-Karakorum) heben sich in bezug auf die Jahrringbreite und in den Hochlagen auch auf das Alter von den Wacholderbeständen ab. Sie sind weitaus jünger und die kambiale Aktivität ist erhöht. In 3750m NN liegt die mittlere Jahrringbreite noch weit über 1 mm/a.

Neben den interannuellen Wachstumsvariationen, die zwischen den Bäumen eines Standorts und in vielen Fällen auch zwischen den Standorten synchron sind, sind die entscheidenden Frequenzen in den Jahrringreihen das sogenannte Low-Frequency und Very-Low-Frequency Signal. Insbesondere die mittelfristigen Wachstumsschwankungen über mehrere Dekaden (Low-Frequency Signal) sind in und zwischen den untersuchten Wacholderbeständen äußerst parallel. An verschiedenen Stellen dieser Arbeit werden sie sogar als das originäre Signal angesprochen, was der Dominanz dieser Wellenlänge Rechnung trägt. Detaillierte Untersuchungen der Homogenität bestätigen, daß mittelfristige Wachstumsvariationen vor allem zwischen den Hochlagenstandorten der Täler des NW-Karakorum synchronisiert werden können. Ein Vergleich dieses Hochlagensignals mit den entsprechenden Standorten im kirgisischen Karagai Tal zeigt, daß zahlreiche Wachstumsoptima und -depressionen zwischen den 500 km entfernt gelegenen Untersuchungsregionen parallel sind. Ganz offensichtlich handelt es sich zumindest in Teilen um eine Rekonstruktion überregionaler Wachstumsschwankungen, die für das westliche Zentralasien Gültigkeit hat.

Synchrone Wachstumsvariationen über mehrere Jahrhunderte, sogenannte säkulare Trends, können aus Jahrringsequenzen extrem alter, 1000-jähriger Wacholder von Standorten nahe der oberen Waldgrenze im NW-Karakorum extrahiert werden. Diese äußerst niederfrequenten Variationen ermöglichen die Rekonstruktion eines sogenannten Very-Low-Frequency Signals seit AD 618.

Vor allem die parallelen mittelfristigen Wachstumsschwankungen über mehrere Dekaden und die synchronen Variationen von Jahr zu Jahr belegen die klimatische Sensitivität des vorliegenden Materials. Gleichläufige Zuwachskurven mehrerer Individuen eines Standorts sind die Reaktion auf gleichartig limitierende Umweltfaktoren. Wenn aber synchrone Kurvenverläufe auch zwischen Standortchronologien nachgewiesen werden können –

wie es im vorliegenden Fall zutrifft – müssen Klimaelemente das Wachstum nachhaltig steuern. Die Ähnlichkeit der mittelfristigen Wachstumsschwankungen zwischen den kirgisischen und pakistanischen Beständen legt zunächst eine übergeordnete Bedeutung der Temperaturen auf die kambiale Aktivität nahe, da die Niederschläge in Zentralasien eine räumlich größere Diversität zeigen (BÖHNER 1996).

Die synchronen interannuellen Jahrringvariationen münden schließlich in eine Extremjahrenanalyse, in der die Parallelen zwischen den Standortweiserjahren und deren klimatische Steuerung untersucht werden. Generell überwiegt die Bedeutung negativer Weiserjahre gegenüber den positiven. Nach einem Verfahren, daß an CROPPER (1979) angelehnt ist, heben sich auffallend schmale Jahrringe deutlicher von den benachbarten Zuwächsen ab, sie sind stärker und sie treten zwischen den Einzelbäumen eines Standorts sowie zwischen verschiedenen Standorten synchroner auf. Somit ist auch das paläoklimatische Potential negativer Weiserjahre größer als das von positiven. Nach AD 1427 können acht positive und 17 negative überregionale Weiserjahre nachgewiesen werden. Das sind Extremjahre, die sich an den Standorten der Untersuchungsregionen durchsetzen und zwischen dem NW-Karakorum *und* dem Tien Shan deckungsgleich sind. Überregionale Weiserjahre belegen die Parallelen zwischen den untersuchten Hochgebirgen und deuten das Potential für ein zentralasiatisches Netzwerk an, in dem (zunächst) die auffallenden Jahrringbreiten für den gesamten Hochgebirgskomplex verglichen werden könnten. Dieser Ansatz wird mit Nachdruck empfohlen.

Eine detaillierte Untersuchung der klimatischen Steuerung regionaler Extremjahre im NW-Karakorum zeigt, daß auffallend schmale und breite Jahrringe durch unterschiedliche klimatische Konstellationen erklärt werden müssen. Für die Kalibration der pakistanischen Proxidaten werden regionale Klimareihen (Mean6) des Niederschlags und der Temperatur aus sechs meteorologischen Stationen berechnet. Auffällig ist, daß die regionalen Weiserjahre (Pakistans) durch gleichläufige Reaktionen von der unteren bis zur oberen Waldgrenze geprägt sind. So verursachen außergewöhnlich kalte Jahre erwartungsgemäß Wachstumseinbrüche an den kühl-feuchten Standorten. Allerdings reagieren die Tieflagenstandorte vergleichbar und in einigen Untersuchungsflächen sogar stärker. Ein gutes Beispiel ist das außergewöhnlich kalte Jahre AD 1917. Insgesamt wird die hohe Erwartungshaltung, die an die Beprobungsstrategie entlang der klimatisch-ökologischen Gradienten geknüpft war, enttäuscht. Die Unterschiede in den Wachstumsmustern spielen insbesondere entlang der vertikalen Transekte eine untergeordnete Rolle (vgl. LA MARCHE 1974).

In einem etwas ungewöhnlichen Ansatz gelingt es zumindest, ausgewählten Extremjahren an Tieflagenstandorten eine stärkere Limitierung durch den Niederschlag zuzuordnen. Standortweiser Jahre, die nicht den regionalen Weiserjahren angehören, werden nahe der unteren Waldgrenze eher durch außergewöhnliche Niederschläge verursacht und nahe der oberen Waldgrenze eher durch außergewöhnliche Temperaturen. Diese Zusammenhänge sind aber nur schwer nachzuweisen und ergänzen lediglich die oben angeführten Ergebnisse zur klimatischen Erklärung von Extremjahren.

Kontinuierliche Zeitreihenanalysen zur Quantifizierung der Klima/Wachstums-Beziehungen beweisen die Bedeutung der Jahrestemperaturen ( $T_{(a)}$  von Mean6) als entscheidenden limitierenden Faktor auf die interannuellen Jahrringbreitenvariationen. Vor allem die Jahrringbreite der Wacholderbäume von Standorten nahe der oberen Waldgrenze wird durch  $T_{(a)}$  gesteuert. Diese Zusammenhänge gelten abgeschwächt auch für die Bäume von den trockeneren, wärmeren Standorten nahe der unteren Waldgrenze im NW-Karakorum. Die errechneten Korrelationskoeffizienten sind zwar überwiegend signifikant, allerdings fallen die absoluten Werte nicht sonderlich hoch aus. Überraschend ist, daß die feucht-kalten Mischbestände mit *Picea smithiana* und *Pinus wallichiana* eher Bezüge zum Niederschlag aufweisen. Die Steuerung der jährlichen kambialen Aktivität durch die Ausprägung der Klimatelemente in einzelnen Monaten kann hingegen nur unbefriedigend nachgewiesen werden. Diese und andere Unschärfen bei der Kalibration sind auf die mangelhafte Repräsentativität der meteorologischen Meßreihen für die Wachstumsbedingungen in den Waldgürteln des NW-Karakorums und auch des Tien Shan zurückzuführen. Die Klimastationen stehen in den Hochgebirgen auf den semiariden Talböden und messen Werte, die nur bedingt für die höher wachsenden Bäume aussagekräftig sind. Dies betrifft insbesondere die Niederschlagaufzeichnungen. Deshalb überrascht nicht, daß die generalisierenden Jahresmittelwerte der Temperatur die höchsten Korrelationskoeffizienten erzielen. Geringfügige Zusammenhänge sind also in erster Linie auf die „Standortungunst“ der Stationsdaten zurückzuführen, da die äußerst synchronen Wachstumsvariationen den starken Einfluß des Klimas verifizieren.

Im Vergleich zur Kalibration der interannuellen Jahrringbreitenvariationen ist die klimatische Steuerung niederfrequenter Signale eindeutig. Korrelationsberechnungen zwischen mittelfristigen Wachstumsvariationen von neun Standorten (obere Waldgrenze, NW-Karakorum) und geglätteten Temperatureaufzeichnungen von sechs Stationen verifizieren die überragende Bedeutung von  $T_{(a)}$  auf das Low-Frequency Signal. Sind die Temperaturen über mehrere Jahre höher, wachsen die pakistanischen Wacholder nahe der oberen Waldgrenze schneller und umgekehrt. Dieser Zusammenhang ist höchst si-

gnifikant. Aufgrund der Ähnlichkeit zwischen den mittelfristigen Wachstumsvariationen in Pakistan und Kirgistan können die Resultate mit Einschränkung auch auf den Tien Shan übertragen werden.

Im Tien Shan selbst verifiziert ein Methodenverbund aus Jahringbreiten (*Juniperus* spez.) und maximalen Spätholzdichten (*Picea tienschanica* Rupr.) die Rolle der Temperaturen auf die interannuelle kambiële Aktivität.

Die enge Beziehung zwischen niederfrequenten Temperaturschwankungen und entsprechenden Jahringbreitenvariationen an der oberen Waldgrenze im NW-Karakorum dient als Grundlage für eine Temperaturrekonstruktion seit AD 790. Danach gab es immer wieder Temperaturschwankungen in Dekadenlänge, deren Amplitude von +0,2 bis -0,2°C reicht. Da aufgrund der gewählten Indexierung säkulare Trends eliminiert werden, um die mittelfristigen Wachstums- bzw. Temperaturvariationen zu betonen, wird abschließend das Low-Frequency auf das Very-Low-Frequency Signal „aufgepflanzt“. Gemeinsam mit den ermittelten überregionalen Weiserjahren entsteht ein umfassendes Bild der „Klimaevents“ im westlichen Zentralasien seit AD 618. Es dokumentiert, daß die bekannten Klimaepochen MO, LIA und rezente Erwärmung in der Untersuchungsregion Gültigkeit haben. Zweitens fanden entlang dieser äußerst niederfrequenten Schwankungen Temperaturvariationen in Dekadenlänge (+0,2 bis -0,2°C) statt. Diese werden drittens durch überregionale Extremjahre in Pakistan *und* Kirgistan seit AD 1427 komplettiert.

Schließlich werden die Ergebnisse dieser Studie evaluiert, indem sie mit observierten Klimaschwankungen aus Zentralasien und anderen, besser untersuchten Räumen der Welt verglichen werden. Demnach geht von den rekonstruierten Wellenlängen eine räumlich unterschiedliche Bedeutung aus.

An verschiedenen Stellen der Arbeit wird deutlich, daß für die Interpretation paläoklimatischer Befunde die erfaßte Zeitscheibe von entscheidender Bedeutung ist. Dies trifft insbesondere auf die Diskussion säkularer Trends und in diesem Zusammenhang auf die Bewertung des aktuellen Klimas zu. Gerade in der momentan vehement geführten Global-Change Debatte ist die jeweils observierte Zeitscheibe maßgeblich. So kommen beispielsweise JACOBY et al. (1996) zu dem Ergebnis, daß die Temperaturen – rekonstruiert an *Pinus sibirica*-Chronologien in der westlichen zentralen Mongolei – in der zweiten Hälfte des 20. Jh.s höher als in allen anderen Perioden der letzten 450 Jahre waren. Ob ein derart dramatischer Befund nicht durch einen Vergleich mit den Temperaturen um die Jahrtausendwende (MO?) anders zu bewerten wäre, bleibt zumindest für die Mongolei vorerst offen. Für fundierte Aussagen zum Paläoklima und die Evaluierung der heutigen Situation sind große Zeitfenster zwar nicht das einzige Kriterium, jedoch ein wesentliches.

## 9 LITERATUR

- AGACHANJANC, O. 1985: Ein ökologischer Ansatz zur Höhenstufengliederung des Pamir-Alai. *Petermanns Geographische Mitteilungen* 128, 17-23.
- AHMED, M. 1989: Tree-Ring Chronologies of *Abies pindrow* (Royle) spach, from the Himalayan Region of Pakistan. *Pakistan Journal of Botany* 21, 347-54.
- AHMED, M. & A.T. SARANGEZAI 1991: Dendrochronological Approach to estimate Age and Growth Rate of Various Species from Himalayan Region of Pakistan. *Pakistan Journal of Botany* 23, 78-89.
- BAHRENBERG, G., GIESE, E. & J. NIPPER 1985: Statistische Methoden in der Geographie I. Stuttgart.
- BAILLIE, M.G.L. 1995: A Slice through Time. London.
- BAILLIE, M.G.L. & J.R. PILCHER 1973: A simple Cross-Dating Programme for Tree-Ring Research. *Tree-Ring Bulletin* 33, 7-14.
- BARNETT, T.P., DÜMENIL, L., SCHLESE, U. & E. ROECKNER 1988: The Effect of Eurasian Snow Cover on Global Climate. *Science* 239, 504-07.
- BECKER, B. 1993: An 11.000-Year German Oak and Pine Chronology for Radiocarbon Calibration. *Radiocarbon* 35, 201-13.
- BHATTACHARYA, A., LA MARCHE, V.C. & F.W. TELEWSKI 1988: Dendrochronological Reconnaissance of the Conifers of Northwestern India. *Tree-Ring Bulletin* 48, 21-30.
- BILHAM, R., PANT, G.B. & G.C. JACOBY 1983: Dendroclimatic Potential of Juniper Trees from the Sir Sar Range in the Karakoram. *Man and Environment* 7, 45-50.
- BÖHNER, J. 1996: Säkulare Klimaschwankungen und rezente Klimatrends Zentral- und Hochasiens. Göttinger Geographische Abhandlungen 101.
- BRÄKER, O.U. 1981: Der Alterstrend bei Jahrringdichten und Jahrringbreiten von Nadelhölzern und sein Ausgleich. *Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien* 142, 75-102.
- BRÄUNING, A. 1994a: Dendrochronologische Untersuchungen an osttibetischen Waldgrenzstandorten. Göttinger Geographische Abhandlungen 95, 185-92.
- BRÄUNING, A. 1994b: Dendrochronology for the Last 1400 Years in Eastern Tibet. *GeoJournal* 34, 75-95.
- BRÄUNING, A. & F. LEHMKUHL 1996: Glazialmorphologische und dendrochronologische Untersuchungen neuzeitlicher Eisrandlagen Ost- und Süd tibets. *Erdkunde* 50, 341-59.
- BRAUN, G. 1996: Vegetationsgeographische Untersuchungen im NW-Karakorum (Pakistan). Kartierung der aktuellen Vegetation und Rekonstruktion der potentiellen Waldverbreitung auf der Basis von Satellitendaten, Gelände- und Einstrahlungsmodellen. Bonner Geographische Abhandlungen 93.

- BRIFFA, K.R., JONES, P.D. & F.H. SCHWEINGRUBER 1988: Summer Temperature Patterns over Europe: A Reconstruction from 1750 A.D. based on Maximum Latewood Density Indices of Conifers. *Quaternary Research* 30, 36-52.
- BRIFFA, K.R., BARTHOLIN, T.S., ECKSTEIN, D., JONES, P.D., KARLÉN, W., SCHWEINGRUBER, F.H. & P. ZETTERBERG 1990: A 1,400-Year Tree-Ring Record of Summer Temperatures in Fennoscandia. *Nature* 346, 434-39.
- BRIFFA, K.R. & P.D. JONES 1992a: Basic Chronology Statistics and Assessment. In: Cook et al. (eds): *Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Science*. Dordrecht, 137-52.
- BRIFFA, K.R., JONES, P.D. & F.H. SCHWEINGRUBER 1992b: Tree-Ring Density Reconstructions of Summer Temperature Patterns across Western North America since 1600. *Journal of Climate* 5, 735-54.
- BRIFFA, K.R., JONES, P.D., SCHWEINGRUBER, F.H., SHIYATOV, S.G. & E.R. COOK 1995: Unusual Twentieth-Century Summer Warmth in a 1000-Year Temperature Record from Siberia. *Nature*, 156-59.
- BRIFFA, K.R., JONES, P.D., SCHWEINGRUBER, F.H., KARLÉN, W. & S.G. SHIYATOV 1996a: Tree-Ring Variables as Proxy-Climate Indicators: Problems with Low-Frequency Signals. In: Jones et al. (eds): *Climatic Variations and Forcing Mechanisms of the last 2000 Years*. Nato ASI Series 1/41. Berlin, 9-41.
- BRIFFA, K.R., JONES, P.D., SCHWEINGRUBER, F.H., SHIYATOV, S. & E.A. VAGANOV 1996b: Development of a North Eurasian Chronology Network: Rationale and Preliminary Results of Comparative Ring-Width and Densitometric Analyses in Northern Russia. *Radiocarbon*, 25-41.
- BRIFFA, K.R., JONES, P.D., SCHWEINGRUBER, F.H. & T.J. OSBORN 1998a: Influence of Volcanic Eruptions on Northern Hemisphere Summer Temperature over the past 600 Years. *Nature* 393, 450-54.
- BRIFFA, K.R., SCHWEINGRUBER, F.H., JONES, P.D., OSBORN, T.J., SHIYATOV, S.G. & E.A. VAGANOV 1998b: Reduced Sensitivity of recent Tree-Growth to Temperature at High Northern Latitudes. *Nature* 391, 678-82.
- COOK, E.R. 1992: A Conceptual Linear Aggregate Model for Tree Rings. In: Cook et al. (eds): *Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Science*. Dordrecht, 98-104.
- COOK, E.R. & G.C. JACOBY 1977: Tree-Ring-Drought Relationship in the Hudson Valley, New York. *Science* 198, 399-401.
- COOK, E.R., BIRD, T., PETERSON, M., BARBETTI, M., BUCKLEY, B., D'ARRIGO, R., FRANCEY, R. & P. TANS 1991: Climate Change in Tasmania inferred from a 1089-Year Tree-Ring Chronology of Huon Pine. *Science* 253, 1266-68.

- COOK, E.R. & K. BRIFFA 1992a: A Comparison of some Tree-Ring Standardization Methods. In: Cook et al. (eds): *Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Science*. Dordrecht, 153-62.
- COOK, E.R., BRIFFA, K., SHIYATOV, S. & V. MAZEPA 1992b: Tree-Ring Standardization and Growth-Trend Estimation. In: Cook et al. (eds): *Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Science*. Dordrecht, 104-23.
- COOK, E.R. & L.A. KAIRIUKSTIS (eds) 1992c: *Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Science*. Dordrecht.
- COOK, E.R., BRIFFA, K.R., MEKO, D.M., GRAYBILL, D.A. & G. FUNKHOUSER 1995: The 'Segment Length Curse' in long Tree-Ring Chronology Development for Palaeoclimatic Studies. *The Holocene* 5, 229-37.
- CRAIG, H. 1954: Isotopic Carbon 13 in Plants and the Relationship between Carbon 13 and Carbon 14 Variations in Nature. *Journal of Geology* 62, 115-49.
- CRAMER, T. 1994: Klimaökologische Studien im Bagrottal (Nordwest Karakorum, Pakistan). Dissertation, Universität Bonn. Bonn
- CROPPER, J.P. 1979: Tree-Ring Skeleton Plotting by Computer. *Tree-Ring Bulletin* 39, 47-59.
- DOUGLASS, A.E. 1941: Crossdating in Dendrochronology. *Journal of Forestry* 39, 825-31.
- EDDY, J.A. (ed) 1992: Past Global Changes Project: Proposed Implementation Plans for Research Activities. IGBP Report 19.
- ESCHBACH, W., NOGLER, P., SCHÄR, E. & F.H. SCHWEINGRUBER 1995: Technical Advances in the Radiodensitometrical Determination of Wood Density. *Dendrochronologia* 13, 155-68.
- ESPER, J. 1994: Versuch einer Klimarekonstruktion mit Hilfe der Dendrochronologie am Beispiel des Hunza-Tales im Karakorum. Unpubl. Diplomarbeit, Bonn.
- ESPER, J., BOSSHARD, A., SCHWEINGRUBER, F.H. & M. WINIGER 1995: Tree-Rings from the Upper Timberline in the Karakorum as Climatic Indicators for the last 1000 Years. *Dendrochronologia* 13, 79-88.
- FARQUHAR, G.D., O'LEARY, M.H. & J.A. BERRY 1982: On the Relationship between Carbon Isotope Discrimination and the Intercellular Carbon Dioxide Concentration in Leaves. *Australian Journal of Plant Physiology* 9, 121-37.
- FENG, Z., THOMPSON, L.G., MOSLEY-THOMPSON, E. & T. YAO 1993: Temporal and Spatial Variations of Climate in China during the last 10.000 Years. *The Holocene* 3, 174-80.
- FERGUSON, C.W. 1968: Bristlecone Pine: Science and Esthetics. *Science* 159, 839-46.
- FLOHN, H. 1947: Zum Klima der Hochgebirge Zentralasiens. *Meteorologische Rundschau* 1, 95-97.

- FLOHN, H. 1956: Zum Klima der Hochgebirge Zentralasiens II. *Meteorologische Rundschau* 9, 85-88.
- FLOHN, H. 1958: Beiträge zur Klimakunde von Hochasien. *Erdkunde* 12, 294-308.
- FLOHN, H. 1969: Zum Klima und Wasserhaushalt des Hindukuschs und der benachbarten Hochgebirge. *Erdkunde* 23, 205-15.
- FLOHN, H. 1988: Das Problem der Klimaänderungen in Vergangenheit und Zukunft. Darmstadt.
- FLOHN, H., HANTEL, M. & E. RUPRECHT 1970: Investigations on the Indian Monsoon Climate. Bonner Meteorologische Abhandlungen 14.
- FRAHM, J.P. & D. KLAUS 1997: Moose als Indikatoren von Klimafluktuationen in Mitteleuropa. *Erdkunde* 51, 181-90.
- FRANZ, H.J. 1966: Die landschaftlichen Höhenstufen in Hochgebirgen des asiatischen Teils der UdSSR. *Geographische Berichte* 39, 122-35 & 209-40.
- FRITTS, H.C. 1969: *Bristlecone pine* in the White Mountains of California: Growth and Ring-Width Characteristics. Papers of the Laboratory of Tree-Ring Research 4.
- FRITTS, H.C. 1976: Tree Rings and Climate. London.
- FRITTS, H.C., GUIOT, J., GORDON, G.A. & F.H. SCHWEINGRUBER 1992: Methods of Calibration, Verification, and Reconstruction. In: Cook et al. (eds): Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Science. Dordrecht, 163-217.
- GASSER, T. & H.G. MÜLLER 1984: Estimating Regression Functions and their Derivatives by the Kernel Method. *Scandinavian Journal of Statistics* 11, 171-85.
- GASSE, F., ARNOLD, M., FONTES, J.C., FORT, M., GIBERT, E., HUC, A., BINGYAN, L., YUANFANG, L., QING, L., MÉLIÈRES, F., CAMPO, E., FUBAO, W. & Z. QINGSONG 1991: A 13,000-Year Climate Record from Western Tibet. *Nature* 353, 742-45.
- GRAYBILL, D.A., SHIYATOV, S.G. & V.F. BURMISTROV 1992: Recent Dendrochronological Investigations in Kirghizia, USSR. In: Bartholin et al. (eds): Tree Rings and Environment. Lundqua report 34, 123-27.
- GRAYBILL, D.A. & S.B. IDSO 1993: Detecting the Aerial Fertilization Effect of Atmospheric CO<sub>2</sub> Enrichment in Tree-Ring Chronologies. *Global Biochemical Cycles* 7, 81-95.
- HAFFNER, W. 1997: Hochasien: Der Effekt großer Massenerhebungen. *Geographische Rundschau* 49, 307-314.
- HASERODT, K. 1989: Zur pleistozänen und postglazialen Vergletscherung zwischen Hindukusch, Karakorum und Westhimalaya. Beiträge und Materialien zur Regionalen Geographie 2, 181-233.
- HOLSTEIN, E. 1980: Mitteleuropäische Eichenchronologie. Mainz am Rhein.

- HOLZHAUSER, H. 1997: Fluctuations of the Grosser Aletsch Glacier and the Gorner Glacier during the last 3200 Years: New Results. In: Frenzel et al. (eds): Glacier Fluctuations during the Holocene. *Palaeoclimate Research* 24, 35-58.
- HÜSKEN, W. 1994: Dendrochronologische und ökologische Studien an Nadelhölzern im Gebiet der Prager Dolomiten (Südtirol/Italien). *Dissertationes Botanicae* 215.
- HUGHES, M.K. 1992: Dendroclimatic Evidence from the Western Himalaya. In Bradley et al. (eds): *Climate since A.D. 1500*. London, 415-31.
- HUGHES, M.K. 1996: Role of Dendrochronology in PAGES. In: Mikami, T. et al. (eds): *Paleoclimate and Environmental Variability in Austral-Asian Transect during the Past 2000 Years*. Proceedings of the 1995 Nagoya IGBP-PAGES/PEP-II Symposium. Nagoya, 39-44.
- HUGHES, M.K., KELLY, P.M., PILCHER, J.R. & V.C. LA MARCHE (eds) 1982: *Climate from Tree Rings*. Cambridge.
- HUGHES, M.K. & L.J. GRAUMLICH 1996: Multimillennial Dendroclimatic Studies from the Western United States. In: Jones et al. (eds): *Climatic Variations and Forcing Mechanisms of the last 2000 Years*. *Nato ASI Series* 1/41. Berlin, 109-24.
- ISELI, M. & F.H. SCHWEINGRUBER 1989: Sichtbarmachen von Jahrringen für Dendrochronologische Untersuchungen. *Dendrochronologia* 7, 145-57.
- IPCC 1990: *Climate Change - The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge.
- IPCC 1996: *Climate Change 1995 - Economic and Social Dimensions of Climate Change*. Cambridge.
- IVES, J.D. & B. MESSERLI 1989: *The Himalayan Dilemma: Reconciling Development and Conservation*. London
- JACOBY, G.C., D'ARRIGO, R.D. & T. DAVAAJAMTS 1996: Mongolian Tree Rings and 20<sup>th</sup>-Century Warming. *Science* 273, 771-73.
- JONES, P.D., BRADLEY, R.S. & J. JOUZEL (eds) 1996: *Climatic Variations and Forcing Mechanisms of the last 2000 Years*. *Nato ASI Series* 1/41. Berlin.
- KELLY, P.E., COOK, E.R. & D.W. LARSON 1992: Constrained Growth, Cambial Mortality, and Dendrochronology of ancient *Thuja occidentalis* on Cliffs of the Niagara Escarpment: An Eastern Version of *Bristlecone Pine*? *International Journal of Plant Science* 153, 117-27.
- KAENNEL, M. & F.H. SCHWEINGRUBER 1995: *Multilingual Glossary of Dendrochronology*. Bern.
- KICK, W. 1985: Geomorphologie und rezente Gletscheränderungen in Hochasi-en. *Regensburger Geographische Schriften* 19, 53-77.
- KICK, W. 1996: Forschung am Nanga Parbat. *Beiträge und Materialien zur Regionalen Geographie* 8, 1-133.
- KRAUS, H. 1984: Was ist Klima? *Erdkunde* 38, 249-258.

- KRUSIC, P., KENNEY, M. & J. HORNBECK 1987: Preparing Increment Cores for Ring-Width Measurements. *Northern Journal of Applied Forestry* 4, 104-05.
- LA MARCHE, V.C. 1974: Paleoclimatic Inferences from long Tree-Ring Records. *Science* 183, 1043-48.
- LAMB, H.H. 1977: Climate, Present, Past and Future. Vol. 2. London.
- LAMB, H.H. 1982: Climate, History and the Modern World. London.
- LEAVITT, S.W., LIU, Y., HUGHES, M.K., LIU, R., AN, Z., GUTIERREZ, G.M., DANZER, S.R. & X. SHAO 1995: A Single-Year  $\delta^{13}\text{C}$  Chronology from *Pinus tabulaeformis* (Chinese Pine) Tree Rings at Huangling, China. *Radiocarbon* 37, 605-10.
- LUCKMAN, B.H., BRIFFA, K.R., JONES, P.D. & F.H. SCHWEINGRUBER 1997: Tree-Ring based Reconstruction of Summer Temperatures at Columbia Icefield, Alberta, Canada, AD 1073-1983. *The Holocene* 7, 375-89.
- LYDOLPH, P.E. 1977: Climates of the Soviet Union. In: Landsberg, H.E. (ed): World Survey of Climatology, Vol. 7. Amsterdam.
- MAMYTOV, A.M. 1968: Soils of Central Tien Shan. Jerusalem.
- MAYEWSKI, P.A., PREGENT, G.P., JESCHKE, P.A. & N. AHMAD 1980: Himalayan and Trans-Himalayan Glacier Fluctuations and the South Asian Monsoon Record. *Arctic and Alpine Research* 12, 171-82.
- MANN, E.M., BRADLEY, R.S. & M.K. HUGHES 1998: Global-Scale Temperature Patterns and Climate Forcing over the Past Six Centuries. *Nature* 392, 779-87.
- MIEHE, G. 1991: Der Himalaya, eine multizonale Gebirgsregion. In: Walter et al. (eds): Ökologie der Erde, Bd. 4. Gemäßigte und Arktische Zone außerhalb Euro-Nordasiens. Stuttgart, 181-230.
- MIEHE, S., CRAMER, T., JACOBSEN, J.P. & M. WINIGER 1996: Humidity Conditions in the Western Karakorum as indicated by Climatic Data and Corresponding Distribution Patterns of the Montane and Alpine Vegetation. *Erdkunde* 50, 190-204.
- MILLER, K.J. 1984: The International Karakoram Project. 2 Vols. Cambridge.
- NÜSSER, M. 1998: Nanga Parbat (NW-Himalaya): Naturräumliche Ressourcenausstattung und humanökologische Gefügemuster der Landnutzung. *Bonner Geographische Abhandlungen* 97.
- OERLEMANS, J. 1994: Quantifying Global Warming from the Retreat of Glaciers. *Science* 264, 243-45.
- OHMURA, A., LANG, H., BLUMER, F. & D. GREBNER 1990: Glacial Climate Research in the Tienshan. *Zürcher Geographische Schriften* 38.
- PAFFEN, K.H., PILLEWIZER, W. & H.J. SCHNEIDER 1956: Forschungen im Hunza-Karakorum. Vorläufiger Bericht über die wissenschaftlichen Arbeiten der Deutsch-Österreichischen Himalaya-Karakorum-Expedition 1954. *Erdkunde* 10, 1-33.
- PAGES (IGBP) 1994: Pages Project Status and Work Plan (1994-1998). Bern.

- PAGES (IGBP) 1995: Paleoclimates of the Northern and Southern Hemispheres. *Pages Workshop Report Series* 95-1.
- PANT, G.B., BORGAONKAR, H.P. & K. RUPA KUMAR 1990: Climate during the past 250 Years over the Western Himalayas: A Dendroclimatic Reconstruction. *Memoirs Geological Society of India* 32, 78-97.
- RAMESH, R., BHATTACHARYA, S.K. & K. GOPALAN 1985: Dendroclimatological Implications of Isotope Coherence in Trees from Kashmir Valley, India. *Nature* 317, 802-04.
- REIMERS, F. 1992: Untersuchungen zur Variabilität der Niederschläge in den Hochgebirgen Nordpakistans und angrenzender Gebiete. Beiträge und Materialien zur Regionalen Geographie 6.
- RIEMER, T. 1994: Über die Varianz von Jahrringbreiten. Statistische Methoden für die Auswertung der jährlichen Dickenzuwächse von Bäumen unter sich ändernden Lebensbedingungen. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme 121.
- REINEKE, T., BOTSCHKE, J., SKOWRONEK, A. & M. WINIGER 1997: Zur Bodenvariabilität im oberen Bagrot-Tal (Karakorum/Nordpakistan). *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 85, 1203-06.
- RÖTHLISBERGER, F. & M.A. GEYH 1985: Glacier Variations in Himalayas and Karakorum. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 21, 237-49.
- SCHÄR, E. & F.H. SCHWEINGRUBER 1987: Nacheiszeitliche Stammfunde aus Grächen im Wallis. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 138, 497-515.
- SCHICKHOFF, U. 1993: Das Kaghan-Tal im Westhimalaya (Pakistan). Studien zur landschaftsökologischen Differenzierung und zum Landschaftswandel mit vegetationskundlichem Ansatz. Bonner Geographische Abhandlungen 87.
- SCHICKHOFF, U. 1995: Verbreitung, Nutzung und Zerstörung der Höhenwälder im Karakorum und in angrenzenden Hochgebirgsräumen Nordpakistans. *Petermanns Geographische Mitteilungen* 139, 67-85.
- SCHLESER, G.H. 1995: Parameters Determining Carbon Isotopes Ratios in Plants. In: FRENZEL B., STAUFFER, B. & M.M. WEIß (eds): Problems of Stable Isotopes in Tree Rings, Lake Sediments and Peat Bogs as Climatic Evidence for the Holocene. *Paläoklimaforschung/Palaeoclimate Research* 15, 71-96.
- SCHÖNWIESE, C. 1995: Klimaänderungen - Daten, Analysen, Prognosen. Berlin.
- SCHWEINFURTH, U. 1956: Über klimatische Trockentäler im Himalaya. *Erdkunde* 10, 297-302.
- SCHWEINGRUBER, F.H. 1978: Mikroskopische Holzanatomie. Formenspektren mitteleuropäischer Stamm- und Zweighölzer zur Bestimmung von rezentem und subfossilem Material. Zug.
- SCHWEINGRUBER, F.H. 1983: Der Jahring. Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie. Bern.

- SCHWEINGRUBER, F.H. 1992: Baum und Holz in der Dendrochronologie. Bir-mensdorf.
- SCHWEINGRUBER, F.H. 1996: Tree Rings and Environment - Dendroecology. Bern.
- SCHWEINGRUBER, F.H., FRITTS, H.C., BRÄKER, O.U., DREW, L.G. & E. SCHÄR 1978: The X-Ray Technique as applied to Dendroclimatology. *Tree Ring Bulletin* 38, 61-91.
- SCHWEINGRUBER, F.H., ECKSTEIN, D., SERRE-BACHET F. & O.U. BRÄKER 1990: Identification, Presentation and Interpretation of Event Years and Pointer Years in Dendrochronology. *Dendrochronologia* 8, 9-38.
- SCHWEINGRUBER, F.H., BRIFFA, K.R. & P.D. JONES 1991a: Yearly Maps of Summer Temperatures in Western Europe from A.D. 1750 to 1975 and Western North America from 1600 to 1982. *Vegetatio* 92, 5-71.
- SCHWEINGRUBER, F.H., WEHRLI, U. AELLEN-RUMO, K. & M. AELLEN 1991b: Weiserjahre als Zeiger extremer Standorteinflüsse. *Schweizer Zeitschrift für Forst-wesen* 142, 33-52.
- SCHWEINGRUBER, F.H., KAIRIUKSTIS, L. & S. SHIYATOV 1992: Sample Selection. In: Cook et al. (eds): Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Science. Dordrecht, 23-35.
- SCHWEINGRUBER, F.H. & K.R. BRIFFA 1996: Tree-Ring Density Networks for Climate Reconstruction. In: JONES, P.D., BRADLEY, R.S. & J. JOUZEL (eds): Climatic Variations and Forcing Mechanisms of the Last 2000 Years. Nato ASI Series 1/41. Berlin.
- SHRODER, J.F. 1980: Dendrogeomorphology: Review and new Techniques of Tree-Ring Dating. *Progress in Physical Geography* 4, 161-88.
- SHRODER, J.F. (ed) 1993: Himalaya to the Sea: Geology, Geomorphology and the Quaternary. London.
- SHIYATOV, S., MAZEPA, V. & E. COOK 1992: Correcting for Trend in Variance due to Changing Sample Size. In: Cook et al. (eds): Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Science. Dordrecht, 133-37.
- SOLOMINA, O.N., SAVOSKUL, O.S. & A.E. CHERKINSKY 1994: Glacier Variations, Mudflow Activity and Landscape Development in the Aksay Valley (Tien Shan) during the Late Holocene. *The Holocene* 4, 25-31.
- STADELBAUER, J. 1997: Zentral- und Hochasien – Kontinentale Peripherie im Schnittpunkt der Kulturen. *Geographische Rundschau* 49, 260-65.
- STOKES, M.A. & T.L. SMILEY 1968: An Introduction to Tree-Ring Dating. Chicago.
- SWETNAM, T.W. 1993: Fire History and Climate Change in Giant *Sequoia* Groves. *Science* 262, 886-89.
- TROLL, C. 1952: Die Lokalwinde der Tropengebirge und ihr Einfluß auf Niederschlag und Vegetation. *Bonner Geographische Abhandlungen* 9, 124-82.

- TESSIER, L. 1989: Spatio-Temporal Analysis of Climate-Tree Ring Relationship. *The New Phytologist* 111, 517-29.
- VILLALBA, R. 1990: Climatic Fluctuations in Northern Patagonia during the last 1000 Years as inferred from Tree-Ring Records. *Quaternary Research* 34, 346-60.
- WALTER, H. & S.W. BRECKLE 1986: Ökologie der Erde, Bd. 3. Spezielle Ökologie der Gemäßigten und Arktischen Zone Euro-Nordasiens. Stuttgart.
- WARREN, W.G. 1980: On Removing the Growth Trend from Dendrochronological Data. *Tree-Ring Bulletin* 40, 35-44.
- WEBER, U.M. 1994: Computer-Aided Processing and Graphical Presentation of Skeleton Plots using Commercial Software Packages. *Dendrochronologia* 12, 147-58.
- WEICKMANN, L. 1962: Beiträge zur Klimatologie des subtropischen Strahlstromes in Nordafrika und Asien. *Beiträge zur Physik der Atmosphäre* 35, 165-83.
- WEIERS, S. 1995: Zur Klimatologie des NW-Karakorum und angrenzender Gebiete. Bonner Geographische Abhandlungen 92.
- WRIGHT, R.D. & H.A. MOONEY 1965: Substrate-oriented Distribution of *Bristlecone pine* in the White Mountains of California. *The American Midland Naturalist* 73, 257-84.
- XIANGDING, W. & S. XUEMEI 1995: Status and Prospects of Dendrochronological Study in Tibetan Plateau. *Dendrochronologia* 13, 89-98.
- XINGCHENG, K., GRAUMLICH, L.J. & P. SHEPPARD 1997: A 1.835 a Tree-Ring Chronology and its Preliminary Analyses in Dulan Region, Qinghai. *Chinese Science Bulletin* 42, 1122-24.
- YADAV, R.R. & A. BHATTACHARYA 1992: A 745-Year Chronology of *Cedrus deodara* from Western Himalaya, India. *Dendrochronologia* 10, 53-61.
- YADAV, R.R., PARK, W.K. & A. BHATTACHARYA 1997: Dendroclimatic Reconstruction of April-May Temperature Fluctuations in the Western Himalaya of India since A.D. 1698. *Quaternary Research* 48, 187-91.
- ZIMMERMANN, B., SCHLESER G.H. & A. BRÄUNING 1997: Preliminary Results of a Tibetan Stable C-Isotope Chronology dating from 1200 to 1994. *Isotopes in Environmental and Health Studies* 33, 157-65.
- ZHENG, S., WU, X. & L. ZHENYAO 1982: Asia: Status of Dendroclimatology. In: Hughes et al. (eds): *Climate from Tree Rings*. Cambridge, 155-58.

## ANHANG I

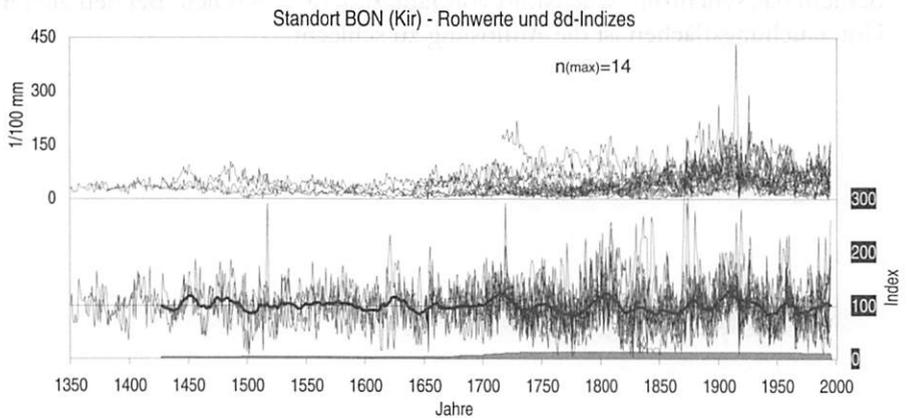
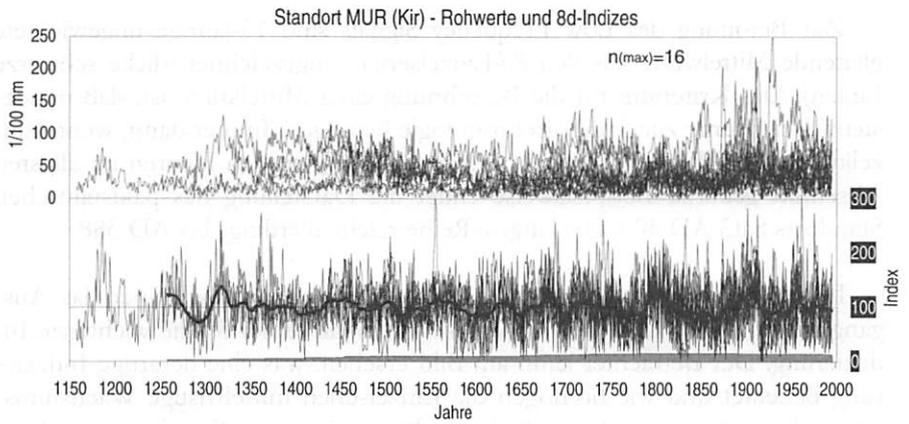
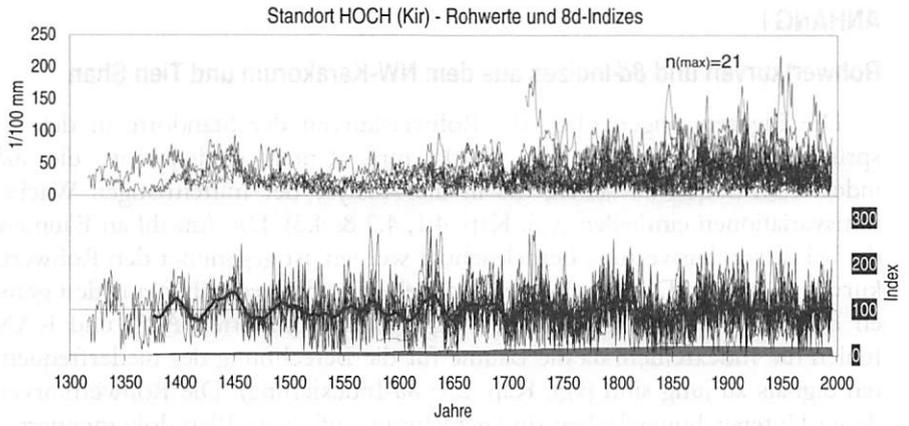
### Rohwertkurven und $\delta d$ -Indizes aus dem NW-Karakorum und Tien Shan

Die Figuren zeigen oben die Rohwertkurven der Standorte in der ursprünglichen Dimension von 1/100 mm. Unten sind jeweils die  $\delta d$ -indexierten Serien zu sehen, die in die Analyse der mittelfristigen Wachstumsvariationen einfließen (vgl. Kap. 4.1, 4.2 & 4.3). Die Anzahl an Bäumen, die bei dieser Auswertung berücksichtigt werden, ist gegenüber den Rohwertkurven reduziert. Die entsprechenden Belegungsdichten gehen aus den grauen Flächen unten hervor. An den kirgisischen Standorten ART und KAN fehlen die Indexreihen, da die Bäume für die Berechnung des niederfrequenten Signals zu jung sind (vgl. Kap. 2.1:  $\delta d$ -Indexierung). Die Rohwertkurven dieser Untersuchungsflächen sind gemeinsam auf einem Blatt dokumentiert.

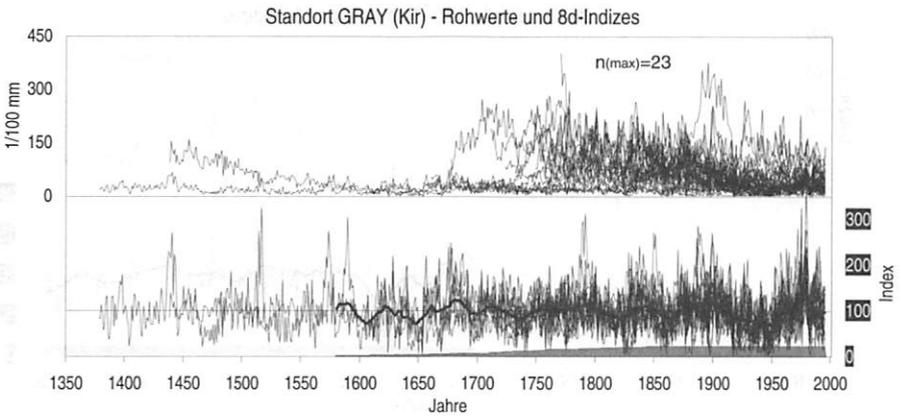
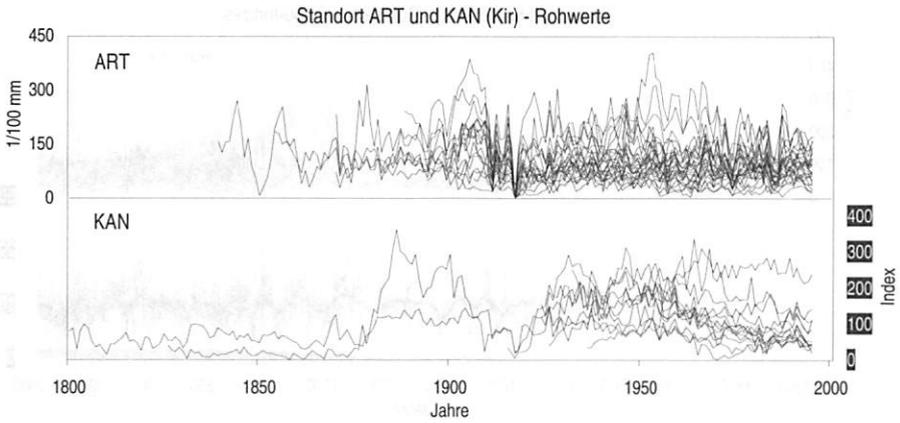
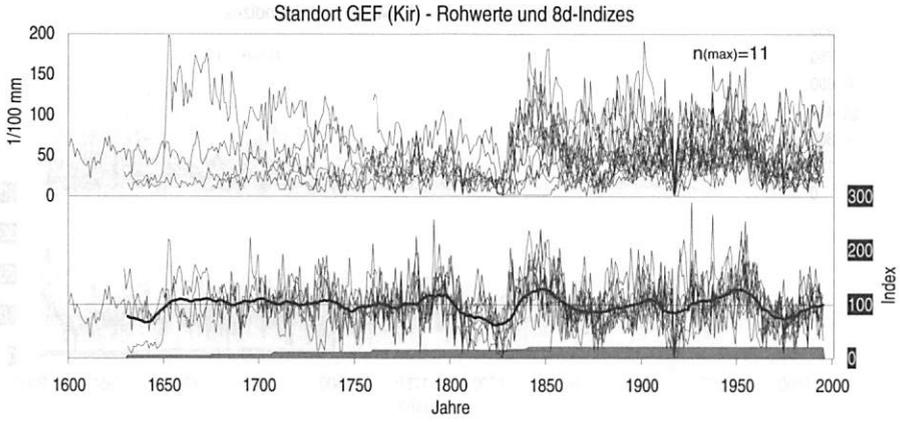
Zur Betonung des Low Frequency Signals sind 15-jährige ungewichtete gleitende Mittelwerte aus den  $\delta d$ -Einzelserien eingezeichnet (dicke schwarze Linien). Das Kriterium für die Berechnung einer Mittelkurve ist, daß mindestens drei Bäume zur Standortchronologie beitragen. Immer dann, wenn Einzelkurven Anschluß an die linke y-Achse haben, wurden Figuren im ältesten Abschnitt gekürzt. Beispielsweise endet die Darstellung des pakistanischen Standorts Sat3 AD 400. Die längste Reihe reicht allerdings bis AD 388.

Die Diagramme in Anhang I gewähren einen Überblick über das Ausgangsmaterial, also die Rohwertkurven und die in dieser Studie wichtigste Indexierung. Der Betrachter kann am Bild ersehen, was eine derartige Indexierung bedeutet und wie homogen die Einzelserien mittelfristige Wachstumschwankungen nachzeichnen. Insbesondere an jüngeren Standorten wird außerdem das synchrone Wachstum von Jahr zu Jahr ersichtlich. Bei den älteren Untersuchungsflächen ist die Auflösung zu schlecht.

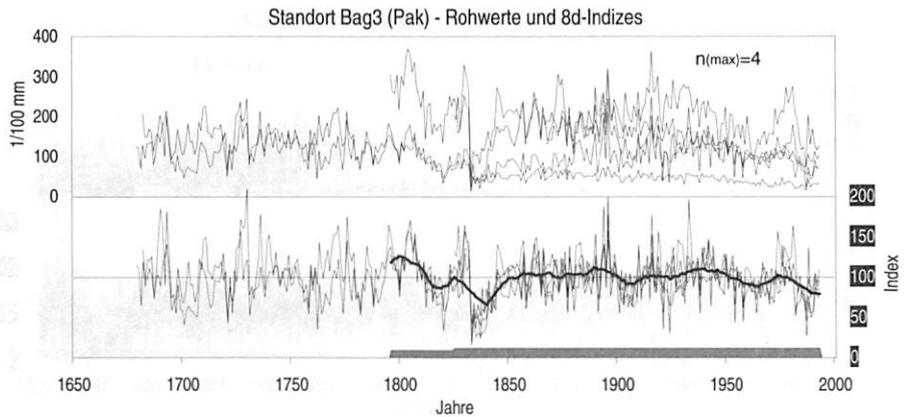
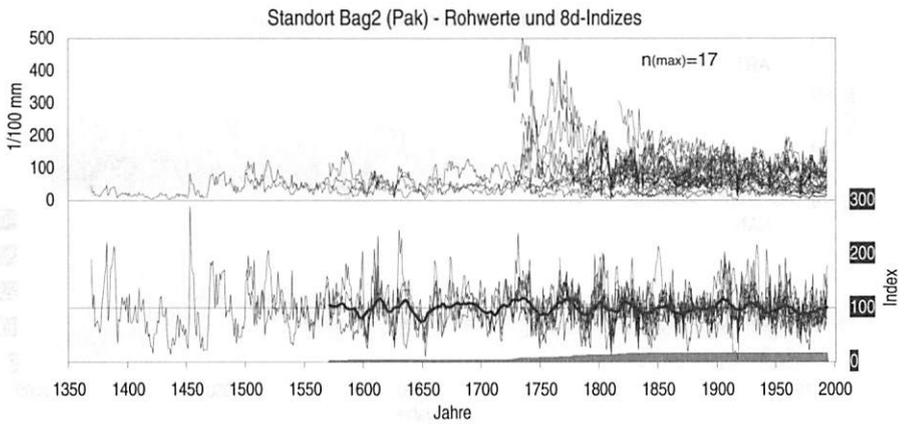
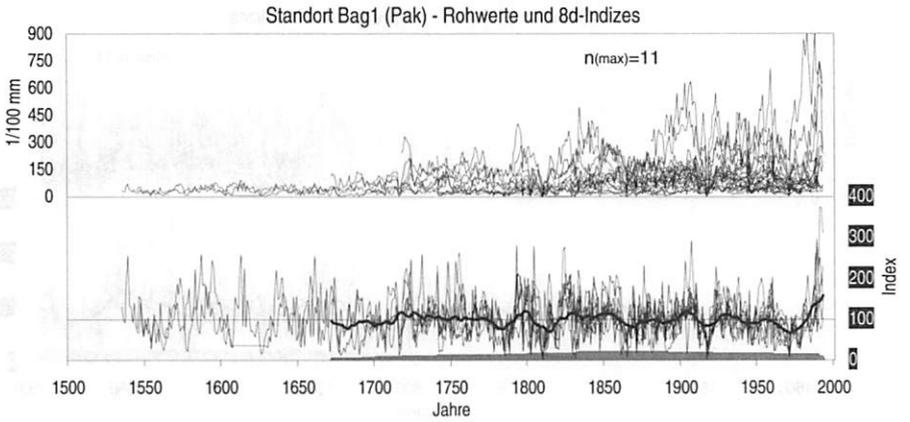
# Anhang I



# Anhang I

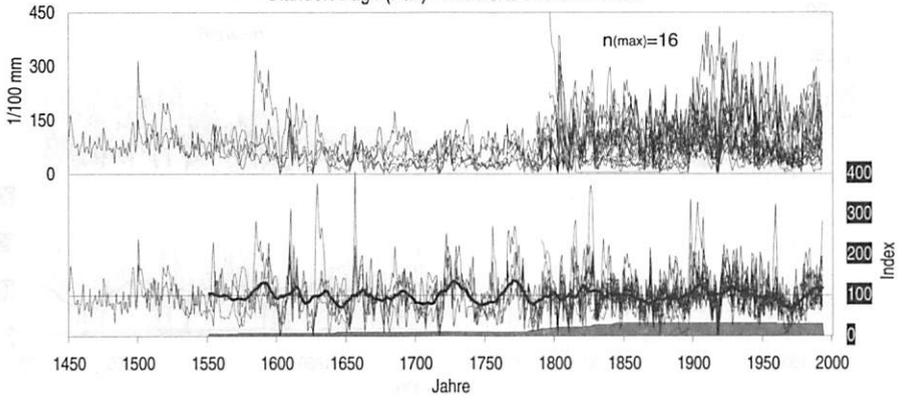


# Anhang I

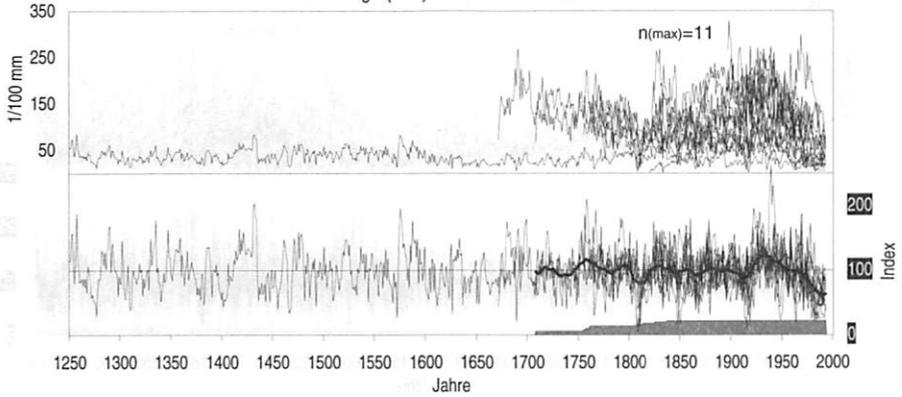


# Anhang I

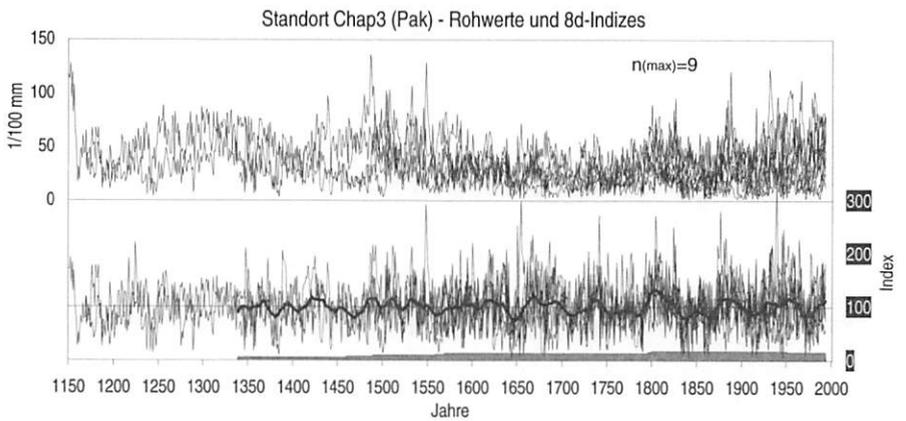
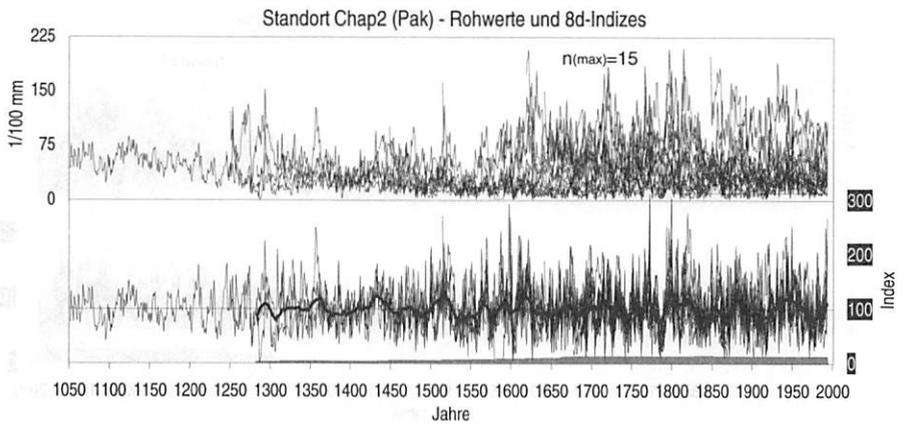
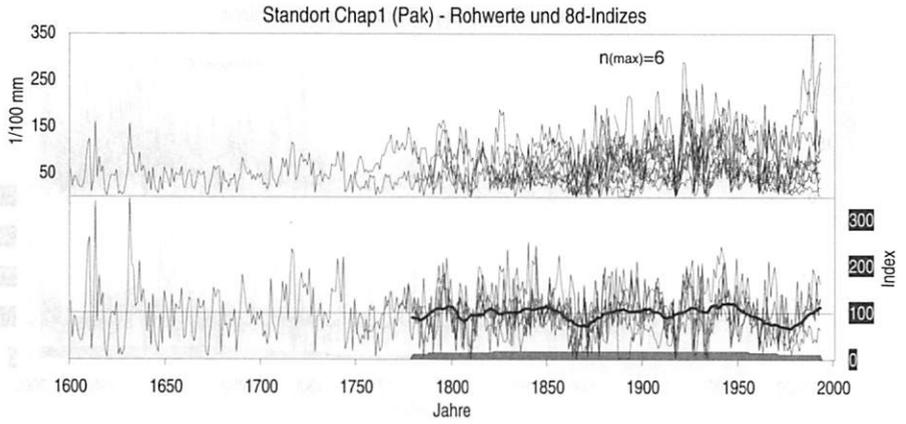
## Standort Bag4 (Pak) - Rohwerte und 8d-Indizes



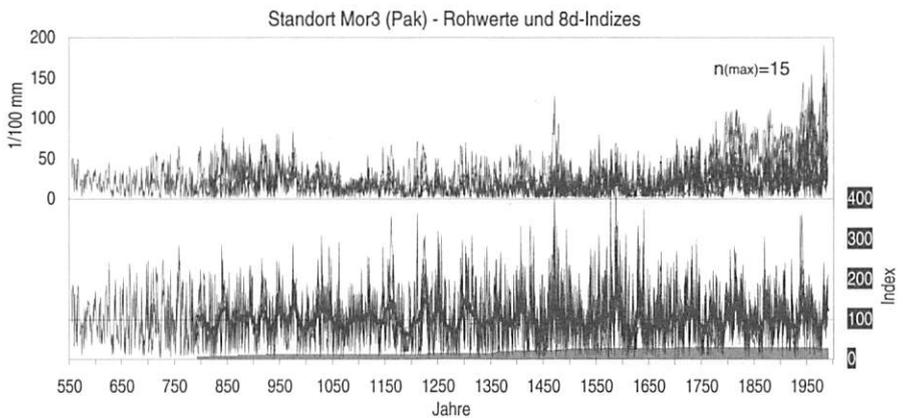
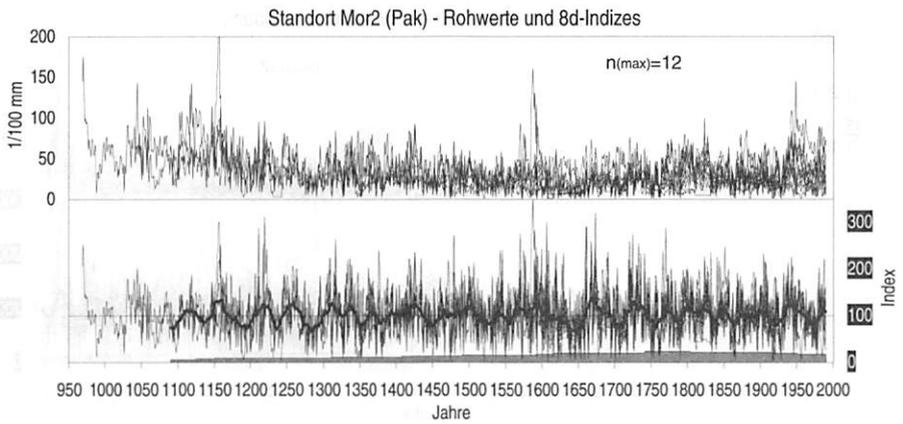
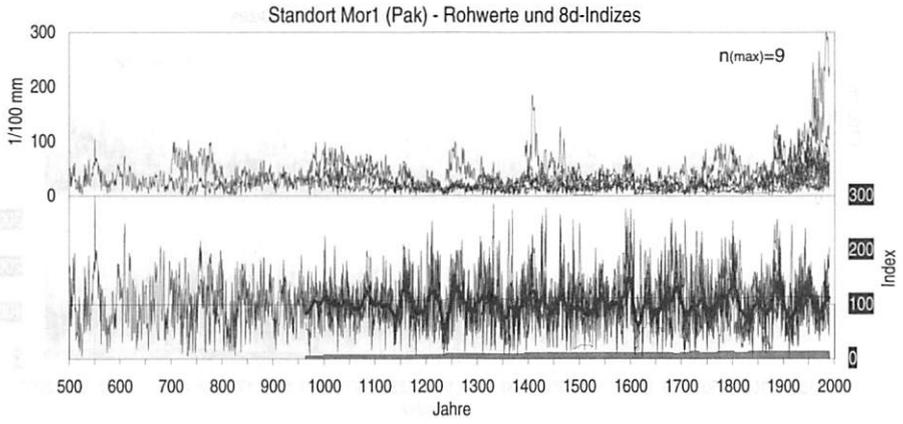
## Standort Bag5 (Pak) - Rohwerte und 8d-Indizes



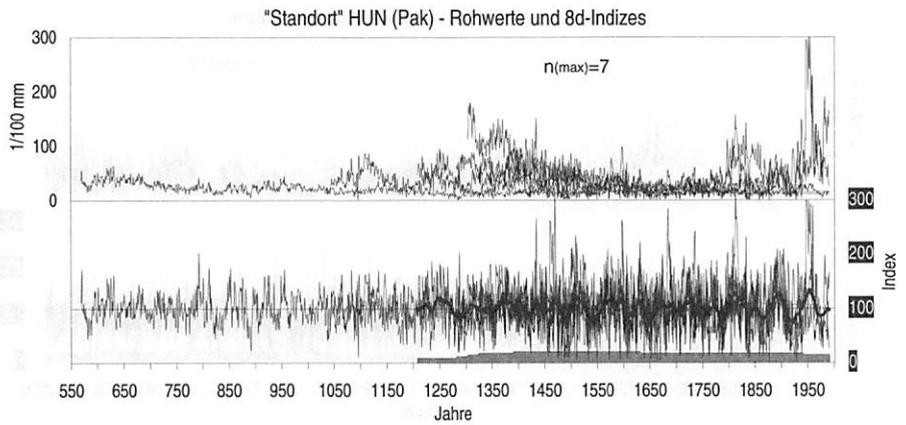
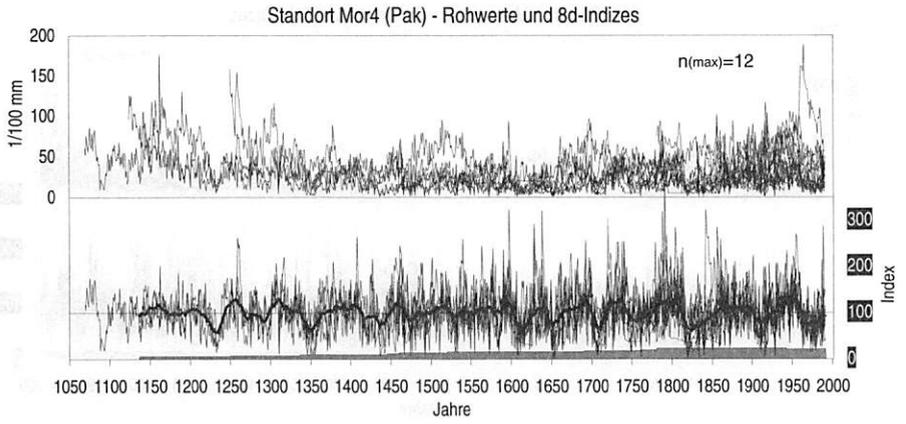
# Anhang I



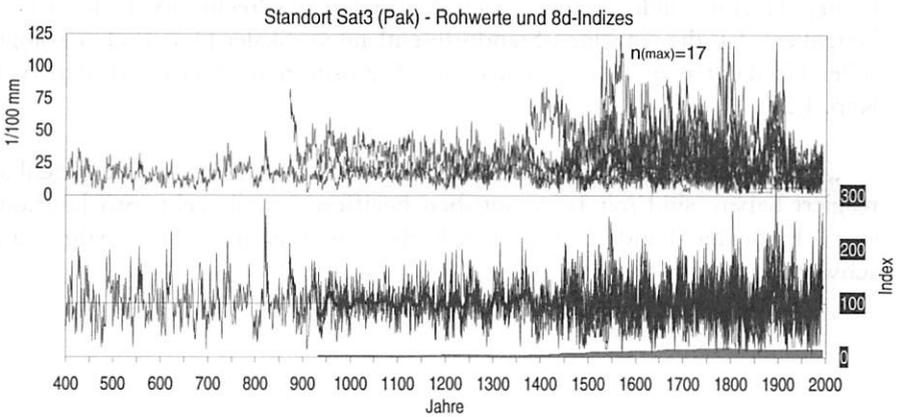
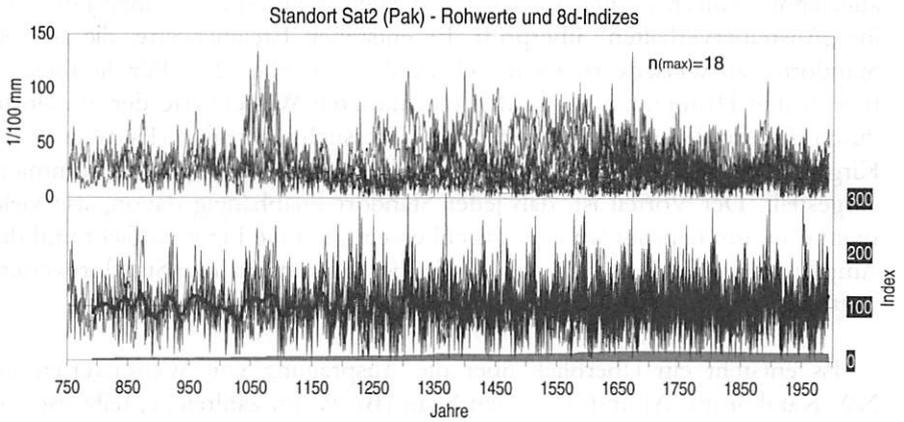
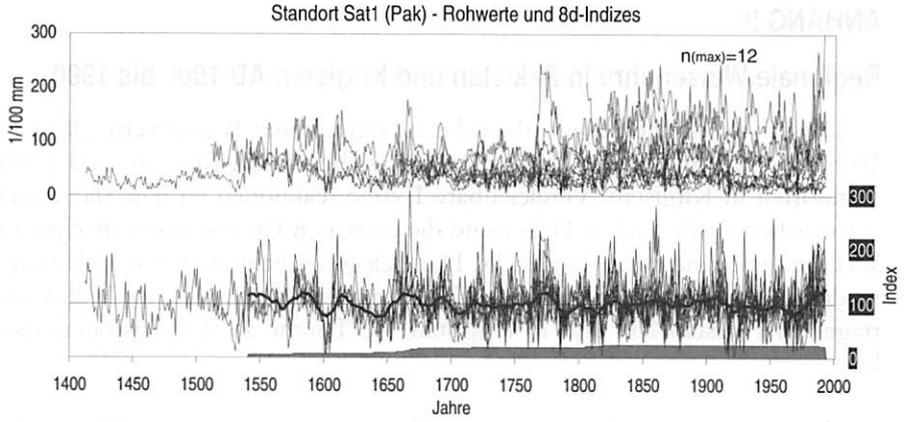
# Anhang I



Anhang I



# Anhang I



## ANHANG II

### Regionale Weiserjahre in Pakistan und Kirgistan AD 1800 bis 1990

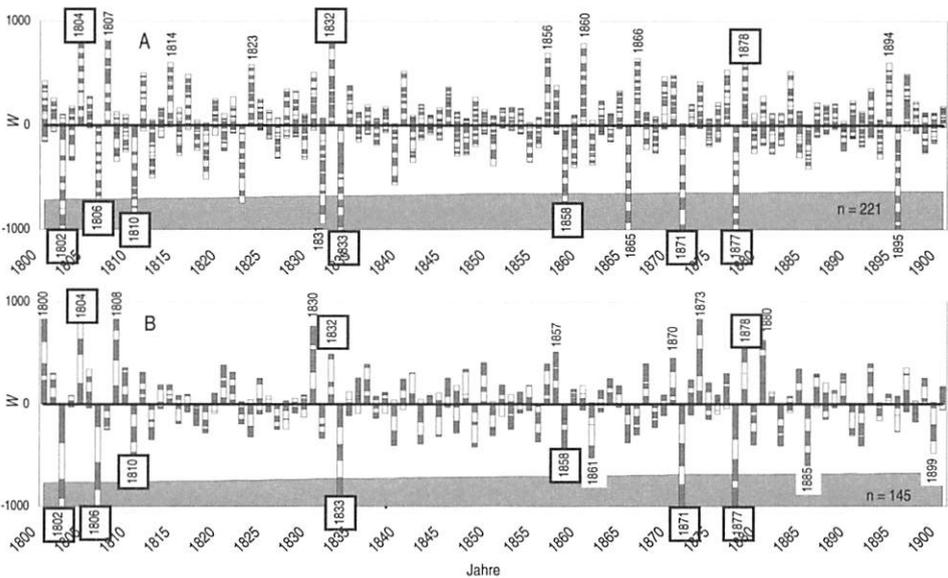
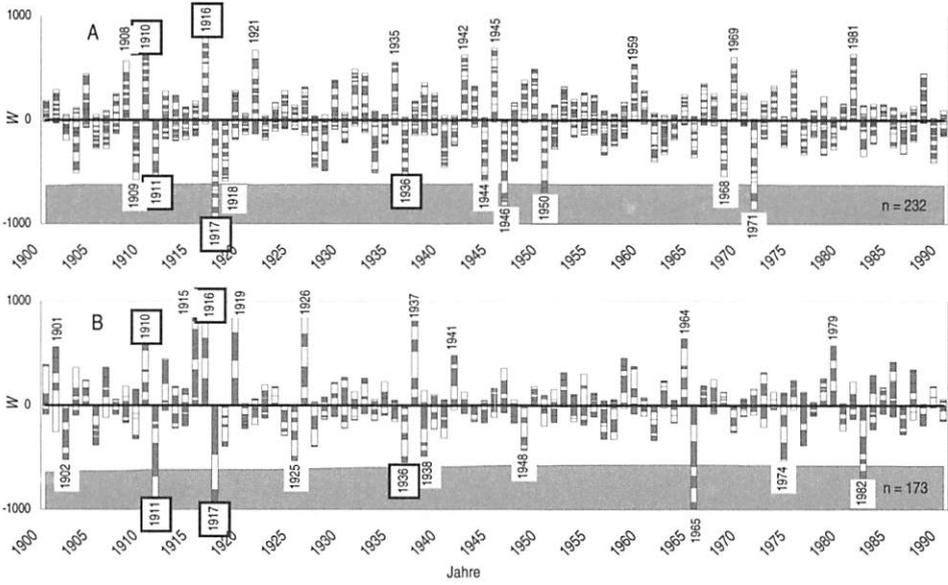
Die Histogramme zeigen oben die aufsummierten Weiserwerte ( $W$ ) von 16 Standorten in Pakistan und unten von sieben (bzw. fünf vor AD 1900) Standorten in Kirgistan. Vergleichbare Extremreaktionen an den Standorten verursachen große Säulen. Dabei sind die einzelnen Untersuchungsflächen im Wechsel grau und weiß dargestellt. Die Belegungsdichten sind jeweils unten in den Diagrammen als hellgraue Fläche eingezeichnet. An der Waldkante tragen in Pakistan 232 und in Kirgistan 173 Bäume zu den Histogrammen bei.

Das Verfahren zur Berechnung von Weiserwerten ist an CROPPER (1979) angelehnt. Danach werden zunächst von jedem Baum die einzelnen Jahre auf ihr „Ausreißerverhalten“ überprüft. Es entstehen Ereigniswerte, die an den Standorten zu Weiserwerten gemittelt werden (vgl. Kap. 2.3). Für die Illustration in den Histogrammen werden die mittleren Weiserwerte der Standorte durch die Anzahl an Standorte in einer Untersuchungsregion (Pakistan = 16, Kirgistan = 7 bzw. 5) dividiert. Die resultierenden Werte sind aufsummiert dargestellt. Der Vorteil ist, daß jeder Standort unabhängig davon, wie viele Bäume an ihm beprobt wurden, gleichberechtigt in die Figur einfließt und die Amplitude der Säulen nach wie vor in der Dimension der Standortweiserwerte liegt.

Es entsteht ein Überblick über die Ausprägung von Weiserwerten im NW-Karakorum (A) und dem Tien Shan (B). Wenn zahlreiche, teilweise sogar alle Standorte einer Region zeitgleich einen auffallend schmalen oder breiten Jahrring bilden, türmen sich die Säulen regelrecht auf. Dabei ist zu bedenken, daß die einzelnen Standorte entlang vertikaler klimatisch-ökologischer Gradienten und in verschiedenen Expositionen angelegt wurden (vgl. Kap. 1.2).

„Regionale Weiserjahre“, wenn viele oder allen Standorte vergleichbar reagiert haben, sind mit Jahresangaben beziffert (jeweils zehn pro Jahrhundert). In beiden Ländern deckungsgleiche (überregionale) Weiserjahre sind schwarz umrandet.

## Anhang II



Illegible text block containing multiple lines of faint, mirrored characters and symbols, possibly bleed-through from the reverse side of the page.

## BONNER GEOGRAPHISCHE ABHANDLUNGEN (Fortsetzung)

- Heft 55: *Selke, W.*: Die Ausländerwanderung als Problem der Raumordnungspolitik in der Bundesrepublik Deutschland. 1977. 167 S. DM 28,--
- Heft 56: *Sander, H.-J.*: Sozialökonomische Klassifikation der kleinbäuerlichen Bevölkerung im Gebiet von Puebla-Tlaxcala (Mexiko). 1977. 169 S. DM 24,--
- Heft 57: *Wiek, K.*: Die städtischen Erholungsflächen. Eine Untersuchung ihrer gesellschaftlichen Bewertung und ihrer geographischen Standorteigenschaften - dargestellt an Beispielen aus Westeuropa und den USA. 1977. 216 S. DM 19,--
- Heft 58: *Frankenberg, P.*: Florengographische Untersuchungen im Raume der Sahara. Ein Beitrag zur pflanzengeographischen Differenzierung des nordafrikanischen Trockenraumes. 1978. 136 S. DM 48,--
- Heft 60: *Liebhold, E.*: Zentralörtlich-funktionalräumliche Strukturen im Siedlungsgefüge der Nordmeseta in Spanien. 1979. 202 S. DM 29,--
- Heft 61: *Leusmann, Ch.*: Strukturierung eines Verkehrsnetzes. Verkehrsgeographische Untersuchungen unter Verwendung graphentheoretischer Ansätze am Beispiel des süddeutschen Eisenbahnnetzes. 1979. 158 S. DM 32,--
- Heft 62: *Seibert, P.*: Die Vegetationskarte des Gebietes von El Bolsón, Provinz Río Negro, und ihre Anwendung in der Landnutzungsplanung. 1979. 96 S. DM 29,--
- Heft 63: *Richter, M.*: Geoökologische Untersuchungen in einem Tessiner Hochgebirgstal. Dargestellt am Val Vegomess im Hinblick auf planerische Maßnahmen. 1979. 209 S. DM 33,--
- Heft 65: *Böhm, H.*: Bodenmobilität und Bodenpreisgefüge in ihrer Bedeutung für die Siedlungsentwicklung. 1980. 261 S. DM 29,--
- Heft 66: *Lauer, W. u. P. Frankenberg*: Untersuchungen zur Humidität und Aridität von Afrika - Das Konzept einer potentiellen Landschaftsverdunstung. 1981. 127 S. DM 32,--
- Heft 67: *Höllermann, P.*: Blockgletscher als Mesoformen der Periglazialstufe - Studien aus europäischen und nordamerikanischen Hochgebirgen. 1983. 84 S. DM 26,--
- Heft 69: *Graafen, R.*: Die rechtlichen Grundlagen der Ressourcenpolitik in der Bundesrepublik Deutschland - Ein Beitrag zur Rechtsgeographie. 1984. 201 S. DM 28,--
- Heft 70: *Freiberg, H.-M.*: Vegetationskundliche Untersuchungen an südchilenischen Vulkanen. 1985. 170 S. DM 33,--
- Heft 71: *Yang, T.*: Die landwirtschaftliche Bodennutzung Taiwans. 1985. 178 S. DM 26,--
- Heft 72: *Gaskin-Reyes, C.E.*: Der informelle Wirtschaftssektor in seiner Bedeutung für die neuere Entwicklung in der nordperuanischen Regionalstadt Trujillo und ihrem Hinterland. 1986. 214 S. DM 29,--
- Heft 73: *Brückner, Ch.*: Untersuchungen zur Bodenerosion auf der Kanarischen Insel Hierro. 1987. 194 S. DM 32,--
- Heft 74: *Frankenberg, P. u. D. Klaus*: Studien zur Vegetationsdynamik Südosttunesiens. 1987. 110 S. DM 29,--
- Heft 75: *Siegburg, W.*: Großmaßstäbige Hangneigungs- und Hangformanalyse mittels statistischer Verfahren. Dargestellt am Beispiel der Dollendorfer Hardt (Siebengebirge). 1987. 243 S. DM 38,--
- Heft 77: *Anhuf, D.*: Klima und Ernteertrag - eine statistische Analyse an ausgewählten Beispielen nord- und südsaharischer Trockenräume - Senegal, Sudan, Tunesien. 1989. 177 S. DM 36,--
- Heft 78: *Rheker, J.R.*: Zur regionalen Entwicklung der Nahrungsmittelproduktion in Pernambuco (Nordostbrasilien). 1989. 177 S. DM 35,--
- Heft 79: *Völkel, J.*: Geomorphologische und pedologische Untersuchungen zum jungquartären Klimawandel in den Dünengebieten Ost-Nigers (Südsahara und Sahel). 1989. 258 S. DM 39,--
- Heft 80: *Bromberger, Ch.*: Habitat, Architecture and Rural Society in the Gilán Plain (Northern Iran). 1989. 104 S. DM 30,--
- Heft 81: *Krause, R.F.*: Stadtgeographische Untersuchungen in der Altstadt von Djidda / Saudi-Arabien. 1991. 76 S. DM 28,--

(Fortsetzung umseitig)

BONNER GEOGRAPHISCHE ABHANDLUNGEN (Fortsetzung)

- Heft 82: *Graafen, R.*: Die räumlichen Auswirkungen der Rechtsvorschriften zum Siedlungsweisen im Deutschen Reich unter besonderer Berücksichtigung von Preußen, in der Zeit der Weimarer Republik. 1991. 283 S. DM 64,--
- Heft 83: *Pfeiffer, L.*: Schwermineralanalysen an Dünenstränden aus Trockengebieten mit Beispielen aus Südsahara, Sahel und Sudan sowie der Namib und der Taklamakan. 1991. 235 S. DM 42,--
- Heft 84: *Dittmann, A. and H.D. Laux (Hrsg.)*: German Geographical Research on North America - A Bibliography with Comments and Annotations. 1992. 398 S. DM 49,--
- Heft 85: *Grunert, J. u. P. Höllermann, (Hrsg.)*: Geomorphologie und Landschaftsökologie. 1992. 224 S. DM 29,--
- Heft 86: *Bachmann, M. u. J. Bendix*: Nebel im Alpenraum. Eine Untersuchung mit Hilfe digitaler Wettersatellitendaten. 1993. 301 S. DM 58,--
- Heft 87: *Schickhoff, U.*: Das Kaghan-Tal im Westhimalaya (Pakistan). 1993. 268 S. DM 54,--
- Heft 88: *Schulte, R.*: Substitut oder Komplement - die Wirkungsbeziehungen zwischen der Telekommunikationstechnik Videokonferenz und dem Luftverkehrsaufkommen deutscher Unternehmen. 1993. 177 S. DM 32,--
- Heft 89: *Lützel, R.*: Räumliche Unterschiede der Sterblichkeit in Japan - Sterblichkeit als Indikator regionaler Lebensbedingungen. 1994. 247 S. DM 42,--
- Heft 90: *Grafe, R.*: Ländliche Entwicklung in Ägypten. Strukturen, Probleme und Perspektiven einer agraren Gesellschaft, dargestellt am Beispiel von drei Dörfern im Fayyüm. 1994. 225 S. DM 46,--
- Heft 91: *Bonine, M.E., Ehlers, E., Krafft, Th. and G. Stöber (Hrsg.)*: The Middle Eastern City and Islamic Urbanism. An Annotated Bibliography of Western Literature. 1994. 877 S. DM 68,--
- Heft 92: *Weiers, S.*: Zur Klimatologie des NW-Karakorum und angrenzender Gebiete. Statistische Analysen unter Einbeziehung von Wettersatellitenbildern und eines Geographischen Informationssystems (GIS). 1995. 216 S. DM 38,--
- Heft 93: *Braun, G.*: Vegetationsgeographische Untersuchungen im NW-Karakorum (Pakistan). 1996. 156 S. DM 54,--
- Heft 94: *Braun, B.*: Neue Cities australischer Metropolen. Die Entstehung multifunktionaler Vorortzentren als Folge der Suburbanisierung. 1996. 316 S. DM 29,--
- Heft 95: *Krafft, Th. u. L. García-Castrillo Riesco (Hrsg.)*: Professionalisierung oder Ökonomisierung im Gesundheitswesen? Rettungsdienst im Umbruch. 1996. 220 S. DM 24,--
- Heft 96: *Kemper, F.-J.*: Wandel und Beharrung von regionalen Haushalts- und Familienstrukturen. Entwicklungsmuster in Deutschland im Zeitraum 1871-1978. 1997. 306 S. DM 34,--
- Heft 97: *Nüsser, M.*: Nanga Parbat (NW-Himalaya): Naturräumliche Ressourcenausstattung und humanökologische Gefügemuster der Landnutzung. 1998. 232 S. DM 42,--
- Heft 98: *Bendix, J.*: Ein neuer Methodenverbund zur Erfassung der klimatologisch-lufthygienischen Situation von Nordrhein-Westfalen. Untersuchungen mit Hilfe boden- und satellitengestützter Fernerkundung und numerischer Modellierung. 1998. 183 S. DM 48,--
- Heft 99: *Dehn, M.*: Szenarien der klimatischen Auslösung alpiner Hangrutschungen. Simulation durch Downscaling allgemeiner Zirkulationsmodelle der Atmosphäre. 1999. 99 S. DM 22,--
- Heft 100: *Krafft, Th.*: Von Shāhjahānābād zu Old Delhi: Zur Persistenz islamischer Strukturelemente in der nordindischen Stadt. 1999. 217 S. DM 39,--
- Heft 101: *Schröder, R.*: Modellierung von Verschlämmung und Infiltration in landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten. 2000. 175 S. DM 24,--
- Heft 102: *Kraas, F. und W. Taubmann (Hrsg.)*: German Geographical Research on East and Southeast Asia. 2000. 154 S. DM 32,--

In Kommission bei Asgard-Verlag, Sankt Augustin

Nicht genannte Nummern sind vergriffen.